



**NÚMERO: 437/2011**  
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**  
**ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**LENITA DE SOUZA FIORITI**

**SIMULAÇÃO FÍSICA DE FLUXOS GRAVITACIONAIS: EFEITOS DA VARIAÇÃO DE  
CONCENTRAÇÃO E VAZÃO DO FLUXO NO DEPÓSITO GERADO**

**Orientador:** Prof. Dr. Giorgio Basilici

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências, da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências, na Área de Geologia e Recursos Naturais.

**CAMPINAS - 2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR  
CÁSSIA RAQUEL DA SILVA – CRB8/5752 – BIBLIOTECA “CONRADO PASCHOALE” DO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
UNICAMP

F513s Fioriti, Lenita de Souza, 1985-  
Simulação física de fluxos gravitacionais : efeitos da  
variação de concentração e vazão do fluxo no depósito  
gerado / Lenita de Souza Fioriti-- Campinas,SP.: [s.n.],  
2011.

Orientador: Giorgio Basilici .  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Instituto de Geociências.

1.Densidade. 2. Simulação e modelagem. 3.  
Sedimentos - Geologia. I. Basilici, Giorgio, 1959- II.  
Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Geociências. III.Título.

Informações para a Biblioteca Digital

**Título em inglês:**Physical simulation of gravitacional flows : the effects of variations in  
concertration and output of the flow in the deposits generated

**Palavras-chaves em ingles:**

Density

Simulation and modeling

Sediments - Geology

**Área de concentração:** Geologia e Recursos Naturais

**Titulação:** Mestre em Geociências.

**Banca examinadora:**

Giorgio Basilici (Presidente)

Alexandra Campana Vidal

Antonio Celso Guirro

**Data da defesa:** 29-08-2011

Programa de Pós-graduação em Geociências



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

**AUTORA:** Lenita de Souza Fioriti

“Simulação física de fluxos gravitacionais: efeitos da variação de concentração e vazão do fluxo no depósito gerado.”

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Giorgio Basilici

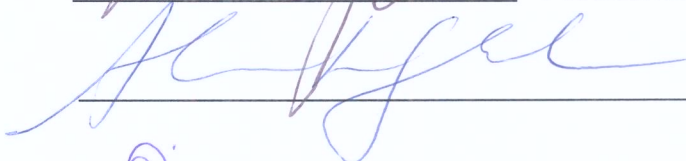
Aprovada em: 29 / 08 / 2011

**EXAMINADORES:**

Prof. Dr. Giorgio Basilici

 - Presidente

Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal



Dr. Antonio Celso Guirro



Campinas, 29 de agosto de 2011

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Antonio e Elisabete, aos meus irmãos, Livia  
e Levy, e ao Marcelo.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao prof. Dr. Giorgio Basilici por ter confiado em mim e ter me orientado em pesquisa de iniciação científica, trabalho de conclusão de curso e nessa pesquisa de mestrado.

Ao Dr. Adriano Roessler Viana, da empresa brasileira Petróleo S.A. (PETROBRAS) por ter acreditado e por ter viabilizado a realização dessa pesquisa de mestrado.

Ao Dr. Antonio Celso Guirro, da PETROBRAS, pela disposição, pela disponibilidade e pelo apoio durante todo o desenvolvimento do estudo, principalmente na etapa de simulação física. Agradeço também pelo incentivo e aprendizado proporcionado.

Ao prof. M.Sc. Rogério Dornelles Maestri e prof. Dra. Ana Luiza de Oliveira Borges, do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por tornar possível a realização das simulações físicas.

Ao Cristiano, do NECOD, por todo apoio, ajuda, dedicação e trabalho durante os experimentos. Sua participação e trabalho foram fundamentais.

Aos pesquisadores do NECOD: Dr. Rafael Manica, M.Sc. Richard Eduard Ducker e M.Sc. Pedro Henrique pelos conselhos e ajudas operacionais durante a etapa de simulação física.

Aos meus pais Antonio José Fioriti e Elisabete Neire de Souza Fioriti por todo o amor e apoio, estando em todos os momentos da minha vida ao meu lado.

Aos meus irmãos Livia de Souza Fioriti e Levy de Souza Fioriti, ao Marcelo Rodrigues, aos meus avós Arlindo, José (em memória), Esmeralda e Águida pelo apoio para finalizar este trabalho.

Aos meus amigos Ancilla Carvalho, Bruno Honório, Iris Helena, Jéssica Colmero, Júlia Reis, Livia Andrade, Paula Bartolo, Patrick Dal Bo, Pedro Lifter, Rafael (Alemão), Reynaldo Pires, Tainá Teixeira, Tessy Bravo, Patrícia Piaia e Wagner (Lobinho) pelo apoio e por entenderem quando não pude estar presente devido às atividades do mestrado.



## Lenita de Souza Fioriti



Nascida em 10 de agosto de 1985, na cidade de Santos – SP. Em 2008 obteve o título de Bacharel em Geologia pela Universidade Estadual de Campinas. Durante a graduação esteve envolvida em pesquisas de iniciação científica relacionadas à técnicas de ensino de geociências (2005), à Província Borborema no Domínio Ceará Central (2006) e à simulações físicas de fluxos gravitacionais (2007). O seu trabalho de conclusão de curso, intitulado como *Proveniência e mecanismos deposicionais de arenitos de sistemas de água profunda: formações Portezuelo del Tontal e Punta Negra (San Juan, Argentina)*, foi orientado pelo Prof. Dr. Giorgio Basilici (2008).

Em 2009 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Estadual de Campinas, na modalidade Mestrado em Geociências. A pesquisa intitulada como *Simulação física de fluxos gravitacionais: Efeitos da variação de concentração e vazão do fluxo no depósito gerado*, orientada pelo Prof. Dr. Giorgio Basilici, foi desenvolvida em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a empresa brasileira Petróleo S.A. (Petrobras).

Em dezembro de 2010 foi contratada pela empresa Halliburton, onde atualmente está atuando no cargo de analista de perfis junior. Seus atuais interesses em pesquisas são relacionados à estratigrafia, sedimentologia e geologia do petróleo.



## SUMÁRIO

RESUMO.....	XXV
ABSTRACT.....	XXVII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	4
1.2. JUSTIFICATIVA .....	4
2. APARATO EXPERIMENTAL E MÉTODOS .....	5
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
3.1. PARÂMETROS DINÂMICOS, GEOMÉTRICOS E CINEMÁTICOS DA CORRENTE.....	20
3.1.1. DINÂMICA DA CORRENTE .....	23
3.1.2. ALTURA DA CORRENTE.....	28
3.1.3. VELOCIDADE DA CORRENTE .....	31
3.2. DEPÓSITO .....	40
3.2.1. DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QCA .....	41
3.2.2. DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QCB .....	46
3.2.3. DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QVA .....	54

3.2.4.	DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QVB .....	59
3.2.5.	ANÁLISE DOS DEPÓSITOS .....	66
3.2.6.	MODELO DEPOSICIONAL.....	71
3.3.	CONDIÇÕES DE SEMELHANÇAS .....	76
3.3.1.	AUMENTO DA ESCALA DO TAMANHO DOS SEDIMENTOS.....	82
3.4.	ANALOGIA ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS SISTEMAS TURBIDÍTICOS DO REGISTRO GEOLÓGICO .....	84
4.	CONCLUSÕES .....	91
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Tanques de experimentação com forma de A) canal - com confinamento lateral; B) bacia - sem confinamento lateral. Modificado de Guirro (2008).....	2
Figura 1. 2: Configuração inicial para simulações físicas de correntes de densidade de A) curta duração e B) longa duração.....	3
Figura 2.1: Canal bidimensional de médio porte utilizado nas simulações físicas. ....	5
Figura 2.2: A) Reservatório; B) Difusor de bucal simples; C) Cuba de dispersão. ....	6
Figura 2.3: Equipamentos utilizados para aquisição dos dados A) Medidor automático de vazão; B) Equipamento de ultra-som; C) Sonda Vectrino; D) Equipamento UVP. ....	7
Figura 2.4: Síntese dos procedimentos seguidos na execução de cada experimento. ....	8
Figura 2.5: Fração granulométrica dos sedimentos utilizados nos experimentos. ....	9
Figura 2.6: Comportamento previsto para a vazão nos experimentos com vazão A) Constante e B) variada. ....	10
Figura 2.7: Nomenclatura dos experimentos de acordo com a vazão e concentração da corrente .....	11
Figura 2.8: Procedimentos utilizados para a coleta de amostras dos depósitos: A) Preparação de tubos de PVC de 50 mm com graxa em sua borda; B) Inserção do tubo de PVC no depósito nos locais de amostragem pré-estabelecidos; C) Aplicação de uma camada de silicone ao redor do tubo de PVC; D) Remoção do material localizado ao redor do tubo de PVC, com o auxílio de uma espátula E) Apenas as amostras permaneceram no tanque de experimentação; F) Secagem natural das amostras.....	13
Figura 3.1: Distribuição granulométrica das amostras coletadas no A) início e B) logo após o término de cada experimento, bem como C) diretamente do reservatório (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).....	15
Figura 3.2: Comportamento da vazão durante as simulações físicas A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).....	17

Figura 3.3: Reologia para os fluxos Newtonianos e não-Newtonianos. Modificado de Shanmungan (2000). .....	19
Figura 3.4: Geometria das correntes de densidade A) Fendas que se desenvolvem no limite da cabeça da corrente; B) Instabilidade de Kelvin-Helmholtz (vórtices). Modificado de Simpson (1987). Comparação com os experimentos realizados. ....	20
Figura 3.5: Fluxo bipartido caracterizado pela porção basal densa e porção superior turbulenta. Desenvolvimento da corrente com a porção superior mais turbulenta na região intermediária/final do tanque em comparação com a região inicial/intermediária, onde a porção superior é mais diluída. A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%). .....	21
Figura 3.6: Relação entre as características dinâmicas das correntes de turbidez e seus depósitos. Modificado de Kneller (1995). ....	24
Figura 3.7: A) Seção da corrente com parâmetros geométricos: h5 altura do nariz da corrente, h4 altura do corpo, h3 zona de mistura, h2 altura do fluido ambiente, h1 altura total do fluido ambiente, U velocidade. Modificado de Simpson (1987). B) Comparação com os experimentos realizados. ....	25
Figura 3.8: Altura do corpo das correntes nos experimentos com vazão A) constante e B) variada (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%). ....	27
Figura 3.9: Velocidades médias das correntes de densidade, medidas a 50 cm da desembocadura e 5 cm do fundo do tanque no decorrer do experimento (sonda Vectrino) A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%). ....	28
Figura 3.10: A altura desenvolvida pela corrente variou durante o seu escoamento, bem como a intensidade da turbulência. Essas variações agregaram ruídos aos dados. Destaque à posição de aquisição dos dados. Fotografias obtidas em diferentes momentos do desenvolvimento do fluxo. A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%). ....	29
Figura 3.11: Velocidades médias das correntes de densidade(QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa	



concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%. ..... 30

Figura 3.12: Velocidades médias das correntes, medidas a 405 cm da desembocadura no decorrer do experimento (Equipamento UVP). Destaque à posição das sondas em relação ao fundo do tanque (cm). A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração (Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%). ..... 31

Figura 3.13: Perfil vertical da velocidade média das correntes no decorrer do experimento (Equipamento UVP). QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração (Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%). ..... 32

Figura 3.14: Perfil de velocidade vertical das correntes de densidade. No esquema inferior, destaca-se a posição correspondente à imagem superior. A sonda 2 registrou os maiores valores de velocidade (Foto representativa: Experimento QCA: vazão constante e alta concentração (20%); distâncias em cm). ..... 33

Figura 3.15: Perfil vertical das correntes simuladas (Foto representativa: Experimento QCA - vazão constante e alta concentração). ..... 34

Figura 3.16: Representação do depósito gerado pela corrente com vazão constante e alta concentração (Experimento QCA, concentração = 20%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação. ..... 37

Figura 3.17: Depósito gerado no experimento com corrente de vazão constante e alta concentração (Experimento QCA; Concentração = 20%). Depósito caracterizado por uma camada basal composta por maior concentração de sedimentos siliciclásticos em comparação com a camada superior..... 38

Figura 3.18: A) Sedimentos de fração granulométrica silte grosso, mal selecionados e textura caótica (nicóis cruzados); B) Grãos de carvão dispersos com tamanho relativamente maior que os demais grãos do arcabouço, os quais estavam envoltos por matriz argilosa (nicóis descruzados); C) Grãos de ballotini envoltos pela matriz argilosa (nicóis cruzados); D) Aumento da presença de carvão e redução das frações granulométricas em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados). ..... 39

Figura 3.19: A) Grão de caulim disperso entre sedimentos de fração granulométrica relativamente menor (nicóis cruzados); B) Diminuição do tamanho dos grãos e maior concentração de carvão em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados). ..... 40

- Figura 3.20: Descrição do depósito no ponto de amostragem 170 cm foi semelhante ao observado nos pontos posteriores A) Camada basal composta por sedimentos pobremente selecionados, textura caótica e contato flutuante predominante. Grãos do arcabouço envoltos por matriz argilosa (nicóis descruzados); B) Diminuição da fração granulométrica dos sedimentos em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados)..... 40
- Figura 3.21: Representação do depósito gerado pela corrente com vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB; concentração = 10%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação.....41
- Figura 3.22: Depósito no início do tanque de experimentação gerado pela corrente de vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB; Concentração = 10%). Destaque às colunas sedimentares representativas do depósito nas posições de 10 cm e 20 cm. .... 42
- Figura 3.23: Depósito gerado pela corrente de vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB, concentração = 10%). A variação textural observada no início do tanque de experimentação tornou-se menos evidente com o aumento da distância percorrida pela corrente. A) Presença de marca de erosão na posição 47 cm. B) Destaque à marca de erosão. .... 43
- Figura 3.24: A) Laminação cruzada de baixo ângulo gerada no experimento com corrente de vazão constante e baixa concentração. B) Ênfase às laminações (Experimento QCB, concentração = 10%).. .... 44
- Figura 3.25: A) Intercalação de lâminas com quantidade relativa de caulim diferenciada, gerada pela corrente de vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB, concentração = 10%). B) Destaque às lâminas geradas no depósito.....44
- Figura 3.26: A) Posição do depósito aonde foi realizada a análise microscópica. O depósito foi caracterizado por duas camadas, uma basal mais espessa e mais clara em relação à camada superior. A camada basal apresentou sutis laminações; B) Lâmina basal composta por grãos de carvão dispersos, ballotini e matriz argilosa (nicóis cruzados); C) A presença de carvão torna-se mais escassa (nicóis cruzados); D) Aumento da concentração de carvão na terceira lâmina e na quarta lâmina, com diminuição de granulometria em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados)..... 45
- Figura 3.27: A) Lâmina inferior composta por grãos dispersos de carvão, ballotini e matriz argilosa (nicóis descruzados); B) Segunda lâmina com sutil diferença em relação à lâmina inferior. A cor da matriz tornou-se mais clara devido à maior concentração de caulim e os grãos de carvão eram mais dispersos (nicóis descruzados); C) Em direção ao topo ocorreu aumento da concentração e fração granulométrica dos grãos de carvão, característico da terceira lâmina (nicóis cruzados); D) No topo da lâmina ocorreu um nível com grãos de carvão com fração granulométrica areia fina. Intensa presença da matriz argilosa (nicóis cruzados). .... 47

Figura 3.28: A) Aspecto geral do depósito a 170 cm da desembocadura (nicóis cruzados); B) Diminuição da fração granulométrica em direção ao topo do depósito (nicóis cruzados). ...	48
Figura 3.29: A) Aspecto geral do depósito gerado a 350 cm da desembocadura (nicóis cruzados); B) Diminuição da fração granulométrica em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados).....	48
Figura 3.30: Representação do depósito gerado pela corrente com vazão variada e alta concentração (Experimento QVA; concentração = 20%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação. ....	49
Figura 3.31: A) Depósito gerado pela corrente com vazão variada e alta concentração no início do tanque de experimentação, caracterizado por três camadas distinguidas devido a variações texturais (concentração = 20%). B) Destaque às camadas geradas.....	50
Figura 3.32: Depósito gerado no experimento com corrente de vazão variada e alta concentração (Experimento QVA; Concentração = 20%). Depósito caracterizado por uma camada basal composta por menor concentração de grãos de carvão em comparação com a camada superior. ....	50
Figura 3.33: A) Posição do depósito aonde foi realizada a análise microscópica; B) Camada basal composta por grãos de carvão dispersos, ballotini e matriz argilosa (nicóis descruzados); C) Concentração de argila aumenta e a fração granulométrica dos grãos de carvão diminui (nicóis descruzados); D) Diminuição da fração granulométrica dos sedimentos em direção ao topo do depósito (nicóis cruzados). ....	51
Figura 3.34: A) Camada basal composta por grãos de ballotini e carvão envoltos por matriz argilosa (nicóis cruzados); B) Em direção ao topo do depósito ocorreu diminuição da fração granulométrica e aumento da concentração de argila e carvão (nicóis cruzados). ....	52
Figura 3.35: Representação do depósito gerado pela corrente com vazão variada e baixa concentração (Experimento QVB; concentração = 10%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação. ....	53
Figura 3.36: A) Depósito gerado no experimento com corrente de vazão variada e baixa concentração (Experimento QVB. Concentração = 10%), onde foi possível observar a formação de quatro camadas distintas. B) Ênfase às camadas geradas. ....	55
Figura 3.37: A) A terceira camada passou a ser gradativamente mais clara a partir de, aproximadamente, 76 cm da desembocadura. B) Ênfase às características descritas.....	55
Figura 3.38: A) Presença de lamina pouco espessa e composta, predominantemente, por carvão entre a terceira e a quarta camada. Essa lâmina não era bem evidente dependendo da porção do depósito. B) Ênfase à lâmina de carvão entre a terceira e a quarta camada. ....	56

Figura 3.39: Na porção distal do tanque de experimentação o depósito era maciço e pouco espesso, o que dificultou a sua descrição .....	56
Figura 3.40: A) Camada basal composta por grãos de ballotini e carvão envoltos por matriz argilosa (nicóis cruzados); B) Camada superior com maior concentração de carvão e caulim (nicóis descruzados).....	57
Figura 3.41: A) Posição do depósito aonde foi realizada a análise microscópica. Ênfase à localização da porção onde foi confeccionada a lâmina delgada; B) Contato entre a camada basal e a camada superior (nicóis descruzados).....	58
Figura 3. 42: A) Camada basal composta por grãos de carvão, ballotini e matriz argilosa (nicóis descruzados); B) Concentração de carvão um pouco mais elevada na camada intermediária em relação à camada anterior (nicóis cruzados); C) Grãos com fração granulométrica relativamente menor em comparação à camada intermediária (nicóis descruzados); D) Nível composto predominantemente por grãos de carvão e caulim com fração granulométrica silte muito fino (nicóis cruzados). .....	59
Figura 3.43: A espessura do depósito diminuiu em direção à porção distal do tanque de experimentação (cm). Essa diferenciação foi mais evidente nos depósitos gerados por fluxos de baixa concentração (10%) em relação aos gerados por fluxos de alta concentração (20%). Fotos representativas dos experimentos A) QVB – vazão variada e baixa concentração e B) QVA – vazão variada e alta concentração.....	60
Figura 3.44: Ondas geradas na interface da porção densa basal e da porção superior turbulenta/diluída A) Experimento QVA (Vazão variada e alta densidade – 20%) e B) Experimento QVB (Vazão variada e baixa densidade – 10%). .....	63
Figura 3.45: Distribuição granulométrica segundo o modelo geológico. Os sedimentos de fração granulométrica maior depositaram-se na região proximal. Em direção à porção distal foram gerados extensos corpos de arenito com fração granulométrica menor. ....	66
Figura 3.46: Comparação da espessura dos depósitos nos distintos experimentos (Experimento QCA: vazão constante e alta concentração; Experimento QCB: vazão constante e baixa concentração; Experimento QVA: vazão variada e alta concentração; QVB: vazão variada e baixa concentração).....	66
Figura 3.47: Perfil vertical esquemático do depósito gerado nos experimentos com vazão constante, com seus respectivos mecanismos deposicionas. A) Corrente com alta concentração apresentou menor variação granulométrica; B) Corrente com baixa concentração apresentou notável diminuição granulométrica em direção ao topo.....	67
Figura 3.48: Perfil vertical esquemático do depósito gerado nos experimentos com vazão variada, com seus respectivos mecanismos deposicionas. A) Corrente com alta concentração	

apresentou camadas decorrentes da variação da vazão e reflexo da diferença de densidade intrínseca da corrente; B) Corrente com baixa concentração apresentou notáveis camadas geradas pela variação da vazão. .... 67

Figura 3.49: Esquema da distribuição longitudinal dos depósitos com ênfase à distribuição lateral das fácies sedimentares e à variação de espessura. A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10% ..... 68

Figura 3.50: Número de Froude Densiométrico (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração=20%;Baixa concentração=10%). ..... 71

Figura 3.51: Comparação do Número de Froude Densiométrico e outros parâmetros de fluxos gravitacionais monitorados na natureza com os simulados. Modificado de Zeng & Lowe (1997) e Guirro (2008) (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%). ..... 72

Figura 3.52: Gráfico da velocidade de queda para os sedimentos e mistura do protótipo segundo a Equação de Rubey (1933). Modificado de Guirro (2008). ..... 74

Figura 3.53: Sequência clássica de Bouma e as novas interpretações para os depósitos turbidíticos ao longo do tempo. Modificado de Shanmungan (1997). ..... 76

Figura 3.54: Comportamento reológico, mecanismos de suporte e registro deposicional das etapas evolutivas do fluxo gravitacional de sedimento ao longo de sua trajetória em direção às porções mais distais da bacia. Modificado de Lowe (1982). ..... 77

Figura 3.55: Localização e mapa geológico esquemático da Bacia do Itajaí. Modificado de Basilici (2006) e De Luca & Basilici (2008). ..... 78

Figura 3.56: Esquema da distribuição dos elementos arquiteturais e hipotética reconstrução do sistema deposicional da Unidade Apiúna (Bacia do Itajaí – Santa Catarina – Brasil) i) pelitos laminados e depósitos de escorregamento – sopé lamoso; ii) pelitos e sutis camadas de arenitos – depósitos de overbank ou de intercanal; iii) arenitos amalgamados – lençóis de areia proximais; iv) arenitos com sutis camadas de pelitos – lençóis de areia distais; v) conglomerados, arenitos e interestratificações de arenitos e pelitos – sistema de canal e diques marginais. Fonte Basilici (2006) e De Luca & Basilici (2008). ..... 79

Figura 3.57: A) Camadas de arenito com geometria tabular a levemente lenticular; B) Arenitos bipartidos: porção inferior composta de arenitos médio-fino sem estrutura e porção superior

composta de arenitos muito finos com estruturas de tração. Modificado de Basilici, 2006 e De Luca & Basilici (2008).....	80
Figura 3.58: Depósitos de canal, representados por arenitos bipartidos similares aos depósitos gerados nas simulações físicas. Bastão de Jacob: 1,5 m. Fonte De Luca & Basilici (2008)..	80
Figura 4.1: Perfil vertical de estratificação do fluxo, com os maiores valores de velocidade registrados entre o limite da região de plug com a porção superior turbulenta.....	82
Figura 4.2: Esquema dos depósitos gerados nas simulações físicas com extrapolação das escalas verticais e horizontais, as quais não são iguais. Depósito formado por agradação, ao considerar um ponto fixo de observação, e por progradação, ao considerar os dados ao longo do espaço.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características dos sedimentos utilizados nas simulações físicas.....	9
Tabela 2.2: Dados experimentais das correntes de densidade de alta e baixa concentração. ....	10
Tabela 3.1: Dados experimentais, com ênfase à massa específica (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%, Baixa concentração = 10%)......	15
Tabela 3.2: Temperaturas medidas antes dos experimentos (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%)......	16
Tabela 3.3: Vazão média no decorrer do tempo de experimento (min) com vazão: A) contínua e B) variada (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%)......	17
Tabela 3.4: Alturas medidas do nariz e da cabeça das correntes (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%)......	26
Tabela 3.5: Resultado da análise granulométrica das amostras pontuais coletadas das distintas camadas observadas no depósito, em porcentagem. ....	54
Tabela 3.6: Velocidade de avanço e altura da corrente (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração=20%;Baixa concentração=10%). ....	70
Tabela 3.7: Limites da variação da velocidade de queda para cada material, com a fração granulométrica correspondente. ....	72
Tabela 3.8: Velocidade de queda dos sedimentos presentes na mistura utilizada nas simulações físicas. ....	73

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Vazão.....	12
Equação 2: Número de Reynolds .....	20
Equação 3: Número de Froude.....	77
Equação 4: Concentração .....	77
Equação 5: Densidade imersa do sedimento .....	77
Equação 6: Velocidade de queda .....	80



## **LISTA DE SÍMBOLOS**

$A$	área
$C$	concentração volumétrica
$Fr$	número de Froude
$G$	aceleração da gravidade
$H$	altura do fluxo
$h$	altura do fluxo
$\rho$	massa específica do fluxo
$\rho_m$	massa específica da mistura
$\rho_s$	massa específica do sedimento
$\rho_a$	massa específica da água
$Q$	vazão
$Re$	número de Reynolds
$R$	densidade imersa do sedimento
$U$	velocidade do fluxo
$\mu$	viscosidade dinâmica do fluxo
$V$	velocidade
$v$	velocidade de avanço da corrente
$w$	velocidade de queda dos grãos





**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**SIMULAÇÃO FÍSICA DE FLUXOS GRAVITACIONAIS: EFEITOS DA VARIAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO E  
VAZÃO DO FLUXO NO DEPÓSITO GERADO**

**RESUMO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**LENITA DE SOUZA FIORITI**

Simulações físicas de correntes de densidade em escala reduzida têm sido desenvolvidas para o entendimento dos processos físicos que ocorrem nos eventos naturais. O presente trabalho apresenta modelagens físicas de fluxos gravitacionais realizadas em tanque com forma de canal (4,5x0,15x0,5m). O objetivo foi o entendimento dos processos hidrodinâmicos e deposicionais de tais fluxos, mediante variações de vazão e concentração. Os dados obtidos experimentalmente foram correlacionados com informações extraídas de afloramentos e do monitoramento dos eventos naturais, obtidas na literatura. Os sedimentos eram constituídos por 30% carvão, 30% ballotini e 40% caulim do volume total de massa da mistura, com frações granulométricas entre argila e areia fina. Foram simuladas correntes: i) com vazão constante e alta concentração (20%); ii) com vazão constante e baixa concentração (10%); iii) com vazão variada e alta concentração (20%); iv) com vazão variada e baixa concentração (10%).

As variações da vazão foram diretamente proporcionais às variações da altura e velocidade da corrente. A maior intensidade das vazões e das velocidades ocasionou uma maior força de resistência do fluido ambiente. O desenvolvimento da altura da corrente foi favorecido devido a essa ação de reação da água ambiente. A variação da concentração foi diretamente proporcional à variação da velocidade e inversamente proporcional à variação da altura da corrente. Esse comportamento foi explicado pelo número de Reynolds. O aumento da concentração do fluxo ocasionou a diminuição da intensidade da turbulência e das alturas desenvolvidas pelo corpo da corrente. Quanto menor a viscosidade de um fluxo, maior é o número de Reynolds, e seu escoamento tende a caracterizar um fluxo turbulento.

As correntes apresentaram estratificação vertical de densidade (fluxo bipartido). A porção inferior foi caracterizada pelo fluxo cisalhante basal, onde a deposição ocorreu por progressiva gradação, e pelo fluxo laminar ou região de *plug*, onde a deposição ocorreu por congelamento em massa. A porção superior foi caracterizada pelo fluxo de turbidez cujo mecanismo de deposição foi a decantação e tração. O aumento da concentração favoreceu o desenvolvimento do *debris flow*. A porção superior turbulenta foi substituída por uma nuvem diluída de grãos finos. Os sedimentos apresentaram tendência de acumulação na porção proximal do tanque, com diminuição da espessura e frações granulométricas dos depósitos em direção à porção distal.

Concluiu-se que o aumento da concentração implicou no aumento da massa do depósito, porém a sua espessura tendeu a permanecer constante. Os grãos foram transportados para mais longe, o que fez com que o comprimento do depósito aumentasse. Isso foi decorrente da interação entre os grãos, a qual favoreceu a capacidade de transporte e inibiu a decantação dos sedimentos (*hindered settling*). As correntes simuladas corresponderam aos fluxos gravitacionais subcríticos monitorados na natureza, cujos sedimentos foram representados por grãos de tamanho entre areia muito fina e seixos. Os resultados experimentais apresentaram analogia com a Unidade Apiúna, localizada na Bacia do Itajaí (Santa Catarina/Brasil), a qual representa uma seqüência clássica de depósitos de água profunda.

**Palavras-chave:** correntes de densidade; simulação física, sedimentos coesivos





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**  
**ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**PHYSICAL SIMULATIONS OF GRAVITATIONAL FLOWS: THE EFFECTS OF VARIATIONS IN  
CONCENTRATION AND OUTPUT OF THE FLOW IN THE DEPOSITS GENERATED**

**ABSTRACT**

**MASTER THESIS**

**LENITA DE SOUZA FIORITI**

Physical simulations of density currents in small scale have been developed to study the physical processes that occur in natural events. The present study deals with laboratory models in flume of gravitational flows (4,5x0,15x0,5m). It was devoted to understanding hydrodynamic and depositional processes, depending on variations in discharge and concentrations of density currents. The experimental data were correlated with information derived from outcrops and monitoring of natural events, which were obtained from literature. Sediments used in the model consisted of 30% coal, 30% silica and 40% kaolin, with grain size range between clay and fine sand. The currents ran down with i) constant discharge and high concentration; ii) constant discharge and low concentration; iii) varied discharge and high concentration; iv) varied discharge and low concentration.

Discharge variations were directly proportional to height and velocity variations of the flow. The highest intensity of flows and velocities resulted in greater resistance force from the fluid environment. The development of high current was favored because of this response action of the fluid environment. Concentration variations were directly proportional to the velocity and inversely proportional to the height variations of the flow. This behavior was explained by Reynolds number. Flow concentration increases caused the decrease of turbulence intensity and the decrease of heights carried by the current.

The currents showed density stratified profile (bipartite flow). The sediments were deposited by progressive aggradations from a basal shear flow, by “freezing” *en masse* from laminar flow and by settling and traction from turbulent/dilute flow. The increase in concentration favored the development of debris flow. The upper turbulent flow was replaced by a dilute cloud of fine grains. The sediments showed a tendency to accumulate in the proximal portion of the flume with deposit thickness and grain size range decreasing towards the distal portion of the flume.

The increase in discharge and concentration resulted in increase of the depositional mass, but its thickness tended to remain constant. The grains were transported over longer distances, which meant that the length of the deposit increase. This was due to the interaction among the grains, which increased the carrying capacity and inhibited the settling of sediments (*hindered settling*). The simulated currents corresponded to subcritical gravity flows monitored in nature, whose sediments were represented by grain size between fine sand and pebbles. The experimental results showed analogy with Apiúna Unit, located in the Itajaí Basin (Santa Catarina/Brazil), which represents a classic sequence of deep water deposits.

**Keywords:** density currents, physical simulation, Reynolds number, Froude number, fall velocity, cohesive sediments



## 1. INTRODUÇÃO

O termo corrente de densidade pode ser definido como um movimento relativo entre camadas de fluído com diferença de massa específica. Essa diferença pode ser causada pela presença de fluídos distintos ou por diferenças de temperatura, salinidade e concentração de partículas em suspensão (Kneller & Buckee, 2000). Em ambiente marinho profundo as correntes de densidade formadas por partículas sólidas em suspensão são conhecidas como fluxos gravitacionais de sedimentos (Middleton & Hampton, 1973). Esses fluxos apresentam grande importância econômica, uma vez que geram rochas reservatório de hidrocarbonetos. Sendo assim, estudos que buscam relacionar as características dos fluxos gravitacionais e seus depósitos são estratégicos para a indústria do petróleo.

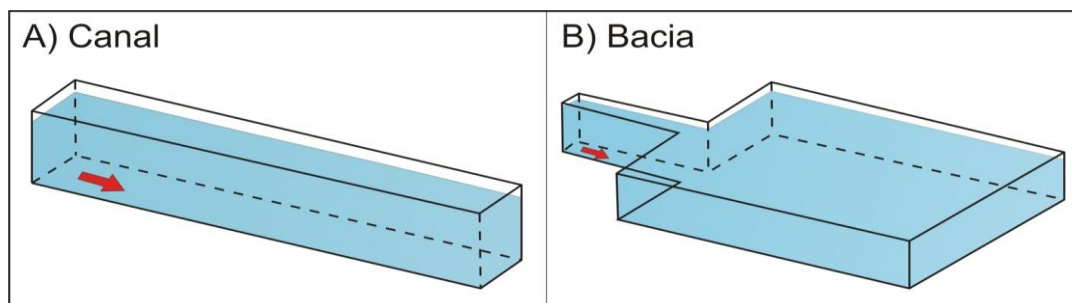
O entendimento de qualquer fenômeno natural só é completamente atingido quando se compreende as condições de causa e efeito envolvidas. As correntes de densidade podem ser estudadas através: i) da análise direta de seus depósitos no registro geológico e em testemunhos de sondagens; ii) da análise indireta de imagens adquiridas por métodos geofísicos, como a sísmica de reflexão; iii) do monitoramento direto dos eventos naturais; iv) de experimentos em escala reduzida (simulações físicas) (Kneller & Buckee, 2000).

A análise do registro geológico permite caracterizar as rochas em relação aos diversos elementos deposicionais que compõem um sistema de sedimentação. Os métodos geofísicos fornecem informações quanto à morfologia e composição do sistema deposicional. Porém, essas análises não estabelecem a relação de causa e efeito entre os depósitos e as características intrínsecas das correntes que os geraram. Os eventos naturais de uma corrente de densidade são esporádicos e catastróficos, o que dificulta as observações do seu desenvolvimento *in situ*. As simulações físicas, através do desenvolvimento de modelos em escala reduzida gerados em laboratório, permitem o controle das condições de contorno dos experimentos e de seus resultados (Kneller & Buckee, 2000; Packman & Jerolmack, 2004; Guirro, 2008). A modelagem física fornece informações que permitem caracterizar a dinâmica do fluxo e avaliar a sua influência nos depósitos gerados, embora o método implique em simplificações.

Os estudos envolvendo simulações físicas de correntes de densidade foram iniciados com os trabalhos de Kuenen (1937, 1950), os quais descreveram os turbiditos com base em dados

experimentais, antes de serem reconhecidos no registro geológico. Posteriormente, afloramentos constituídos por camadas com gradação normal intercaladas a pelitos marinhos foram interpretados como produtos de correntes de turbidez (Kuenen & Migliorini, 1950). Na década de 1960, os estudos que envolveram simulações físicas foram expostos e tratados com um método de investigação mais quantitativo (Middleton 1966a; 1966b; 1966c; 1967). Porém, foi a partir da década de 1980 que os estudos desse tipo tiveram grande impulso. A maior parte investigou as características geométricas e dinâmicas das correntes de densidade em tanques com diferentes graus de confinamento, mediante modificações nas condições de alimentação e concentração do fluxo, do tempo de duração dos experimentos, da declividade e obstáculos do substrato e das faixas granulométricas dos sedimentos. Todavia, trabalhos que investigaram os mecanismos de deposição e as características dos depósitos gerados pelos fluxos gravitacionais, buscando correlacionar os modelos sedimentológicos reais com os modelos de simulação física ou matemática, têm sido menos freqüentes (Lowe, 1982; Middleton & Neal, 1989; Alexander & Morris, 1994; Kneller & Branney, 1995; Vrolijk & Southard, 1997; Mohrig *et al.*, 1999; Stix, 2001; Ávila, 2003; Tinterri *et al.*, 2003; Bass *et al.*, 2004; Leclair & Arnott, 2005; Yu *et al.*, 2006; Guirro, 2008; Manica, 2009).

A maioria dos trabalhos publicados estudou as correntes de densidade em tanques com forma de canal, também conhecidos por *flume* (confinados lateralmente) (Huppert & Simpson, 1980; Laval & Cremer, 1988; Bonnetaze *et al.*, 1993; Sparks *et al.*, 1993; Gladstone *et al.*, 1998; Mulder & Alexander, 2001b; Alexander & Mulder, 2002; McCaffrey *et al.*, 2003; Brito, 2005; Felix *et al.*, 2005) (Figura 1.1A). Os estudos de correntes de densidade em tanques com forma de bacia permitiram analisar correntes que se descolam por um *canyon* e atingem uma bacia marinha profunda (Lüthi, 1981; Siegenther *et al.*, 1984; Alexander & Morris, 1994; Kneller, 1995; Parsons *et al.*, 2001; Manica, 2002; Morris & Alexander, 2003; Del Rey, 2006) (Figura 1.1B).

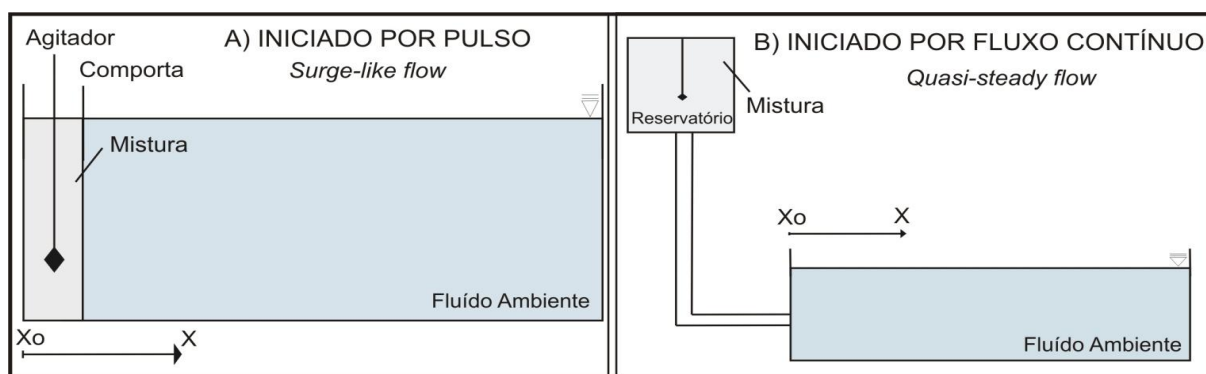


**Figura 1.1:** Tanques de experimentação com forma de A) canal - com confinamento lateral; B) bacia - sem confinamento lateral. Modificado de Guirro (2008).



As correntes de densidade foram classificadas como correntes de curta duração (*surge-like turbidity current*) e correntes de longa duração (*quasi-steady turbidity current*), dependendo dos mecanismos de alimentação (Mulder & Alexander, 2001a). Nas simulações físicas de correntes de curta duração, o mecanismo de alimentação foi por pulso de material. As misturas foram preparadas em um compartimento isolado por uma comporta removível presente no início do tanque de experimentação. Os experimentos foram iniciados com a retirada repentina dessa comporta. As misturas entraram em colapso gravitacional e escoaram pelo tanque devido ao seu excesso de densidade. Esses experimentos simularam eventos gerados por uma perturbação relativamente repentina, como fluxos induzidos por abalos sísmicos ou desmoronamentos de pacotes sedimentares no topo do talude (Mulder & Alexander, 2001a; Guirro, 2008) (Figura 1.2A).

Nas simulações físicas de correntes de longa duração, o mecanismo de alimentação foi o fluxo contínuo de material. As misturas foram preparadas em um reservatório externo, situado a uma posição superior em relação ao tanque de experimentação. A conexão entre eles ocorreu através de um duto, cano ou mangueira de pequeno diâmetro. Os experimentos foram iniciados com a abertura do registro localizado no duto de conexão. Os escoamentos foram produzidos por gravidade. Os experimentos simularam eventos que persistem por um longo período de tempo, durante o qual a corrente permanece sendo retroalimentada. Foram simuladas correntes alimentadas por uma cheia fluvial, denominadas de fluxo hiperpícnal (*hyperpycnal flow*) (Mulder & Alexander, 2001a; Guirro, 2008) (Figura 1.2B).



**Figura 1.2:** Configuração inicial para simulações físicas de correntes de densidade de A) curta duração e B) longa duração.

Os sedimentos mais utilizados nas simulações físicas foram os grãos de sílica, argilominerais, carvão de silício, carvão e plástico. Os sedimentos de sílica foram representados por grãos naturais de quartzo, por micro-esfera de vidro e por sílica moída (Postma *et al.*, 1988; McCaffrey *et al.*, 2003). Os argilominerais foram representados pelo caulim e pela caulinita (Guirro, 2008), algumas vezes misturados a outros tipos de sedimentos (Alexander & Mulder, 2002). Os grãos de carvão de silício, por possuírem densidade superior à dos silicatos, precisaram ter fração granulométrica silte ou argila (Alexander & Morris, 1994). A utilização de grãos de carvão e de plástico, que possuem densidade inferior à do quartzo, facilitou a visualização de gradações nos depósitos (Kneller & Buckee, 2000).

## **1.1. OBJETIVOS**

O objetivo principal desta pesquisa foi a simulação física de correntes de densidade para estabelecer as condições de causa e efeito entre os aspectos geométricos e cinemáticos de tais correntes e seus respectivos depósitos. Entre os aspectos geométricos analisados destacaram-se as alturas do nariz, da cabeça e do corpo da corrente. Entre os aspectos cinemáticos analisados destacou-se a velocidade de avanço. Os parâmetros de variação dos experimentos foram a vazão e a concentração dos fluxos. Os dados obtidos em laboratório foram correlacionados com informações extraídas do registro geológico e do monitoramento de eventos naturais, obtidas na literatura.

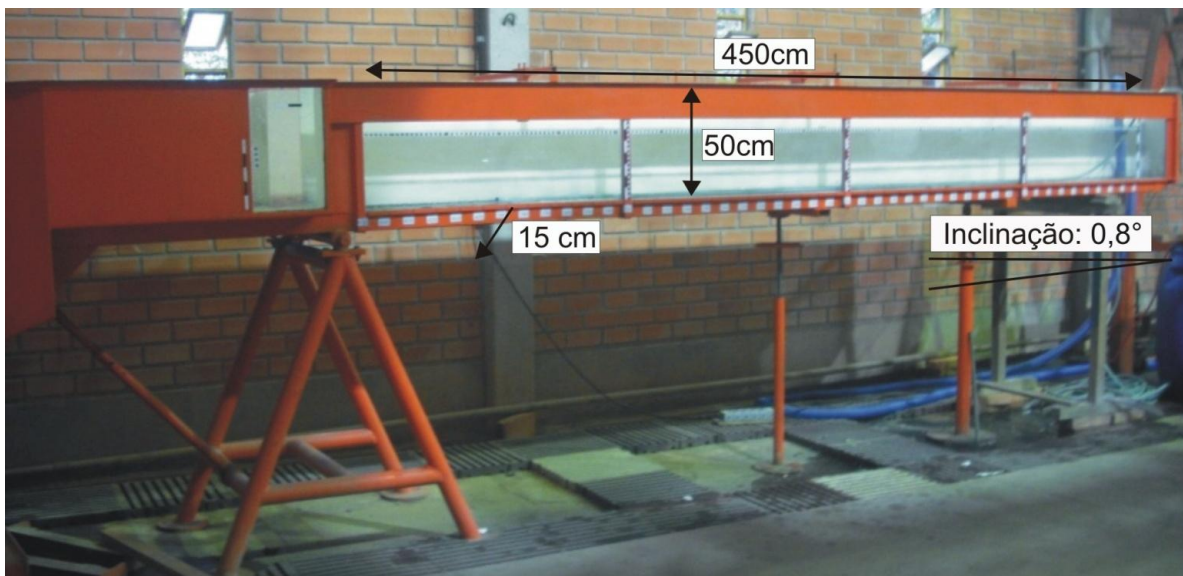
## **1.2. JUSTIFICATIVA**

A modelagem física corresponde a um dos principais métodos de estudos das correntes de densidade, uma vez que fornece informações que permitem correlacionar as características petrofísicas e geométricas dos depósitos com as características intrínsecas das correntes que os geram. Na literatura, a maioria dos estudos avaliou as características geométricas e dinâmicas dos fluxos gravitacionais. Porém, estudos que investigaram a influência dessas características com os mecanismos de deposição e os aspectos texturais das camadas geradas foram menos frequentes. As simulações físicas são importantes para aumentar o nível de embasamento científico na interpretação das fácies turbidíticas, o que é estratégico para a indústria petrolífera.

## 2. APARATO EXPERIMENTAL E MÉTODOS

Essa pesquisa foi desenvolvida como uma parceria entre a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a empresa brasileira Petróleo S. A. (PETROBRAS). As simulações físicas foram realizadas no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), pertencente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da UFRGS. A PETROBRAS colaborou através do apoio de pessoas especializadas no tema de estudo e do financiamento dos gastos relacionados à simulação física (materiais, equipamentos, construção dos tanques etc) e ao apoio logístico (transporte, hospedagem, alimentação, etc.).

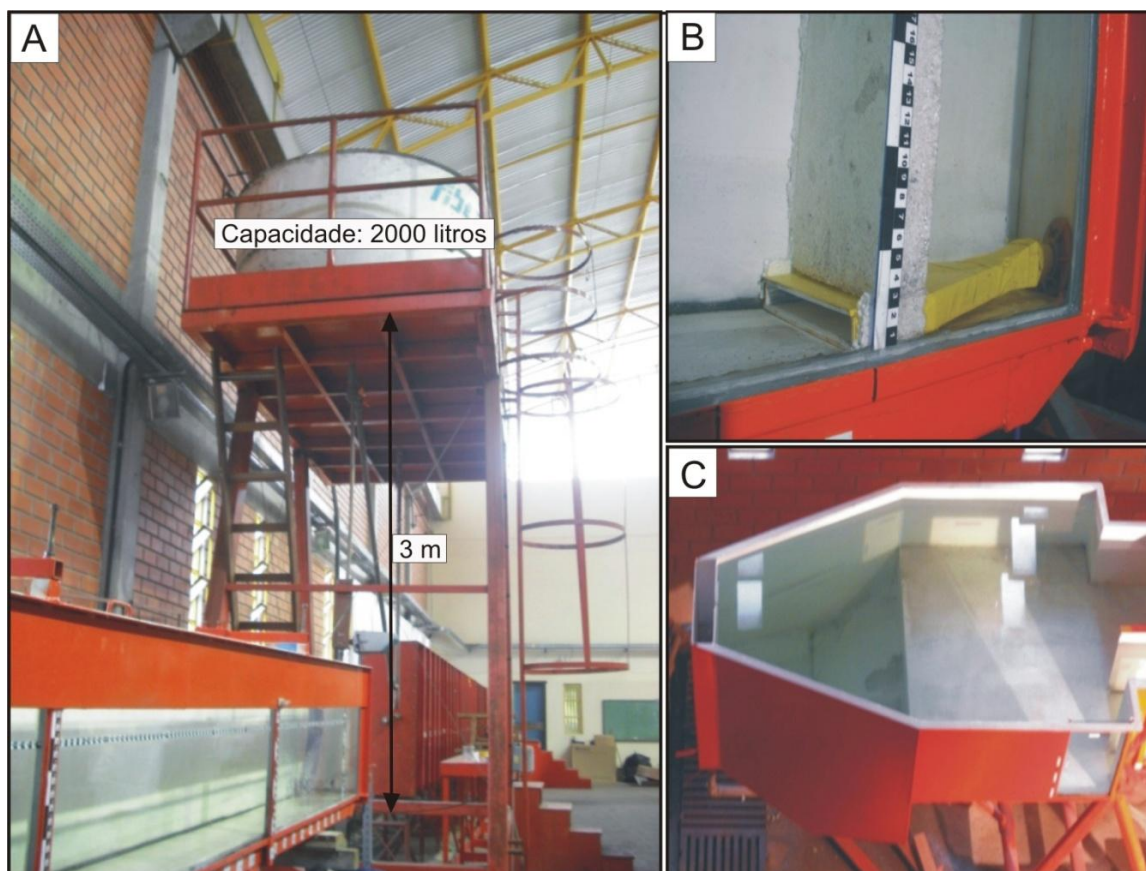
As simulações ocorreram em um tanque com forma de canal bidimensional de médio porte, com dimensões de 450 cm de comprimento, 15 cm de largura e 50 cm de altura. O tanque apresentava uma inclinação geral de  $0,8^\circ$  em relação à horizontal. O seu eixo longitudinal não possuía nenhum trecho com rampa ou inclinação diferenciada. O seu fundo era liso, não possuía nenhum tipo de estrutura simulando rugosidades. Toda a sua extensão apresentava marcação de escala vertical e horizontal e foi preenchido com água até atingir 35 cm de altura, para simular o fluido ambiente (Figura 2.1).



**Figura 2.1:** Canal bidimensional de médio porte utilizado nas simulações físicas.

A altura do tanque foi dimensionada para que a altura da corrente não atingisse a metade da coluna de água ambiente. Isso auxiliou na manutenção das condições de semelhanças dos experimentos com os eventos naturais e evitou a formação dos fluxos de retorno, ou contrafluxos, acima das correntes de densidade (Guirro, 2008). A geração de tais fluxos iria interferir no experimento, devido à entrada excessiva de fluído ambiente dentro da corrente, o que reduziria bruscamente a sua velocidade e permitiria a geração de ondas em sua superfície (Alexander & Mulder, 2002).

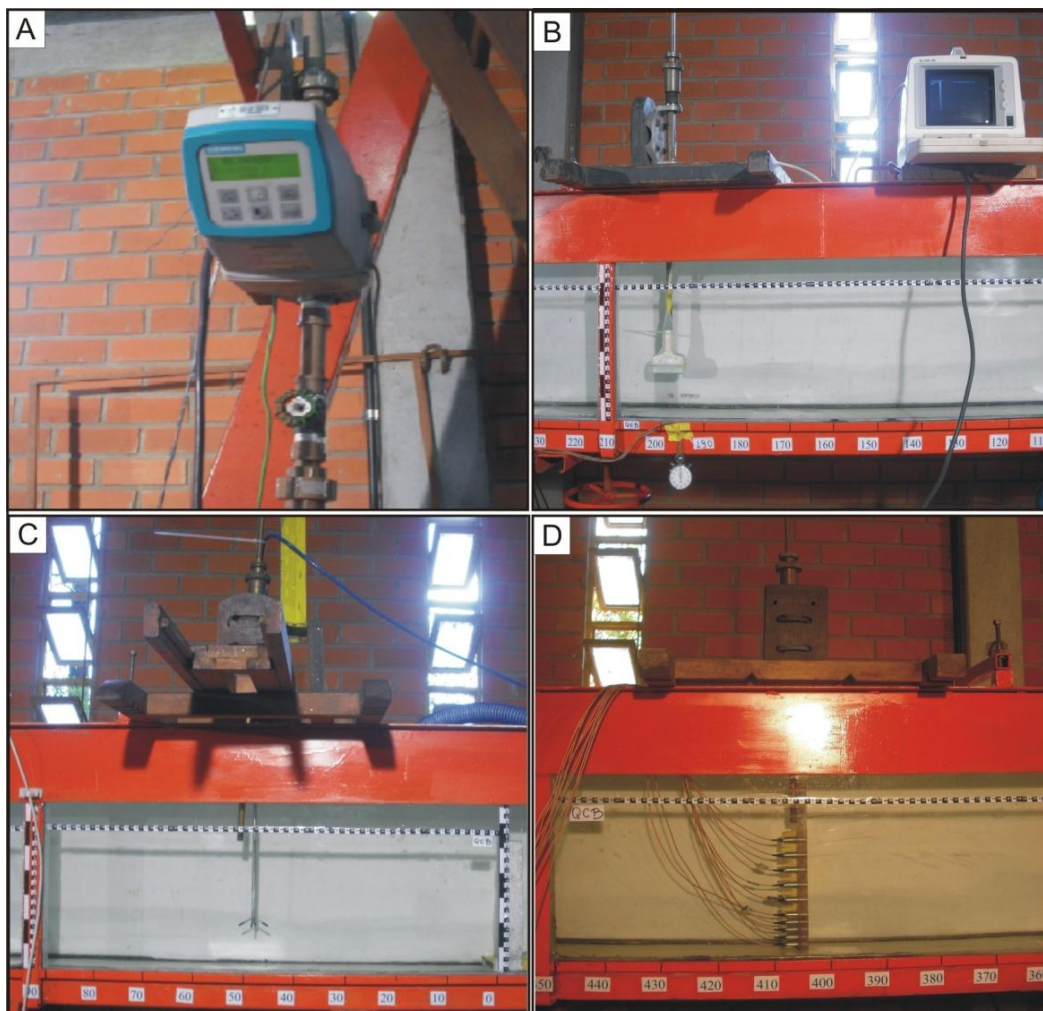
Na cabeceira do tanque de experimentação foi instalado o sistema de alimentação do fluxo (Figura 2.2 A), o qual era composto por um reservatório, um conduto e um difusor. A mistura foi preparada e armazenada no reservatório, com capacidade de 2000 l, localizado sobre uma estrutura metálica a 3 m de altura em relação ao tanque de experimentação (Figura 2.2 A). O conduto (um tubo de PVC com 50 mm de diâmetro) era dotado de registros e conectava o reservatório ao tanque. A mistura foi introduzida horizontalmente e rente ao fundo do mesmo, por fluxo contínuo de material durante determinado período de tempo, através de um difusor de bucal simples (Figura 2.2B). Portanto, foram simuladas correntes de longa duração (*quasi-steady turbidity current*). Na parte distal do tanque havia uma cuba de dispersão (Figura 2.2C) cuja finalidade foi a dissipação de energia da corrente e minimizar a formação de ondas de reflexão.



**Figura 2.2:** A) Reservatório; B) Difusor de bocal simples; C) Cuba de dispersão.

Os principais equipamentos utilizados para a aquisição dos dados foram: medidor automático de vazão (marca Siemens - modelo Sitrans FM Magflo MAG 110) (Figura 2.3A), ecógrafo médico (marca Ge Medical System - modelo 2215670) (Figura 2.3B), medidor tridimensional de velocidade (sonda Vectrino; marca Nortek AS - modelo vectrino fixed prod, ID:VCN 7591) (Figura 2.3C), medidor de velocidade ultrassônico (Ultrasonic Doppler Velocity Profiler – UVP; marca Met-flow AS – modelo UVP DUO MX) (Figura 2.3D), analisador de partículas laser (marca Silas - modelo 1180), filmadoras digitais (marca SONY, modelos TRV 120 e TVR 110) e câmeras fotográficas (marca NIKON, modelo D5000 e marca CASIO, modelo EX-Z9).





**Figura 2.3:** Equipamentos utilizados para aquisição dos dados A) Medidor automático de vazão; B) Equipamento de ultra-som; C) Sonda Vectrino; D) Equipamento UVP.

O ecógrafo médico (equipamento de ultra-som) foi posicionado a 200 cm da desembocadura. As imagens foram captadas pela filmadora da marca SONY, modelo TRV 120, conectada ao equipamento. A sonda Vectrino foi posicionada no início do tanque de experimentação, a 50 cm da desembocadura e a 10 cm em relação ao fundo do mesmo. O equipamento UVP foi posicionado a 405 cm da desembocadura e rente ao fundo do tanque, sendo composto por dez sondas localizadas verticalmente umas sobre as outras.

Os procedimentos executados em cada experimento seguiram uma seqüência de etapas: pré-simulação, simulação e pós-simulação (Figura 2.4).

PRÉ-SIMULAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificação da declividade do canal, comportas, vedações e reservatório.</li> <li>- Determinação do tipo e quantidade de sedimento, massa específica, concentração e quantidade de água a serem utilizados.</li> <li>- Preparação do tanque: Limpeza, colocação das folhas de transparência nos locais de amostragem do depósito, preenchimento com água.</li> <li>- Ajuste das instalações e equipamentos para aquisição de dados.</li> <li>- Verificação das características físicas do fluido ambiente e da mistura.</li> </ul>
SIMULAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pré-ajuste e monitoramento da vazão.</li> <li>- Abertura do registro.</li> <li>- Coleta de amostra da mistura.</li> <li>- Medidas de velocidade das correntes.</li> <li>- Filmagem dos experimentos.</li> <li>- Aquisição de imagens de ultra-som.</li> <li>- Aquisição de fotos das correntes.</li> <li>- Fechamento do registro.</li> </ul>
PÓS-SIMULAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amostragem da mistura.</li> <li>- Leitura do volume de mistura utilizado.</li> <li>- Esvaziamento lento do canal.</li> <li>- Fotografias do depósito.</li> <li>- Amostragem do depósito.</li> <li>- Secagem das amostras.</li> <li>- Tratamento, análise e interpretação dos dados adquiridos nos experimentos.</li> </ul>

**Figura 2.4:** Síntese dos procedimentos seguidos na execução de cada experimento.

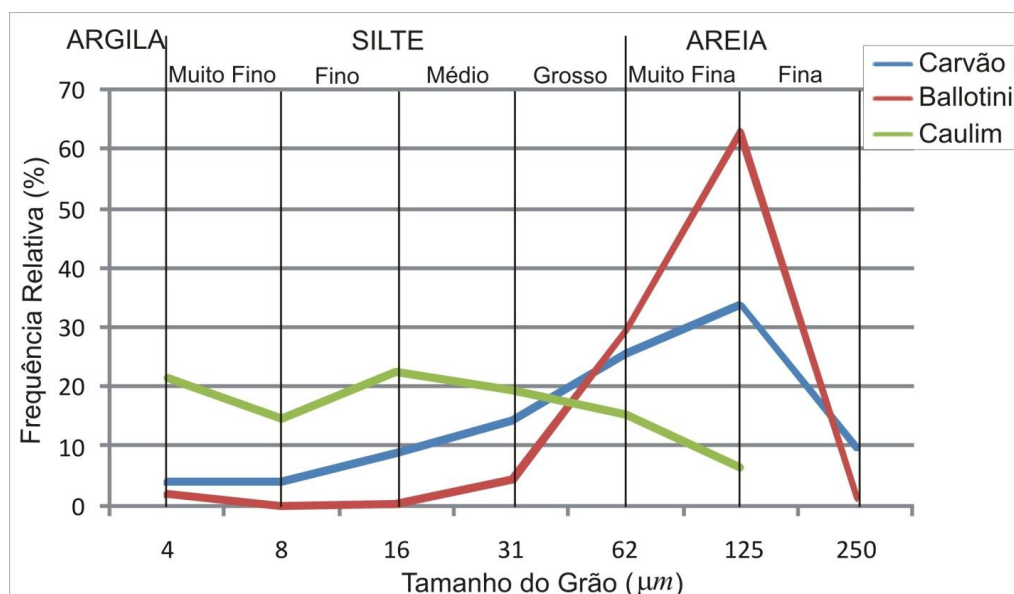
Os tipos e concentrações dos sedimentos utilizados foram determinados com base em informações obtidas na literatura e com a realização de experimentos preliminares. Os sedimentos não coesivos utilizados foram o carvão (minerado pela Empresa Deserto S.A., de Criciúma/SC) e a micro-esfera de vidro, conhecida como Ballotini (produzido pela VI Master Ind. e Com. de Componentes de Vidro, de Diadema/SP), enquanto que o material coesivo foi o caulim (minerado pela Empresa Raabe Calcários LTDA, de Pantano Grande/RS). A mistura apresentou a seguinte proporção dos sedimentos: 30% carvão, 30% ballotini e 40% caulim (Tabela 2.1).

	<b>Carvão</b>	<b>Ballotini</b>	<b>Caulim</b>
<b>Forma do grão</b>	semi-angular a semi-arredondado	arredondada a semi-arredondada	arredondada a semi-arredondada
<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1190	2600	2600
<b>Quantidade total de material utilizado (kg)</b>	69	150	205

**Tabela 2.1:** Características dos sedimentos utilizados nas simulações físicas.

Uma das grandes contribuições desta pesquisa de mestrado foi a utilização de uma mistura composta por sedimentos de diferentes massa específica. Isso nunca foi realizado em trabalhos anteriores. A utilização do carvão facilitou a visualização dos grãos e a identificação de estruturas sedimentares. O carvão era composto, predominantemente, por grãos de fração granulométrica areia muito fina. As frações granulométricas mais significativas do ballotini foram silte grosso e areia muito fina, representando os sedimentos mais grossos da mistura. O caulim possuía, predominantemente, grãos de frações granulométricas argila e silte, representando os sedimentos finos da mistura e aumentando a coesão da corrente (Figura 2.5: Fração granulométrica dos sedimentos utilizados nos experimentos.).





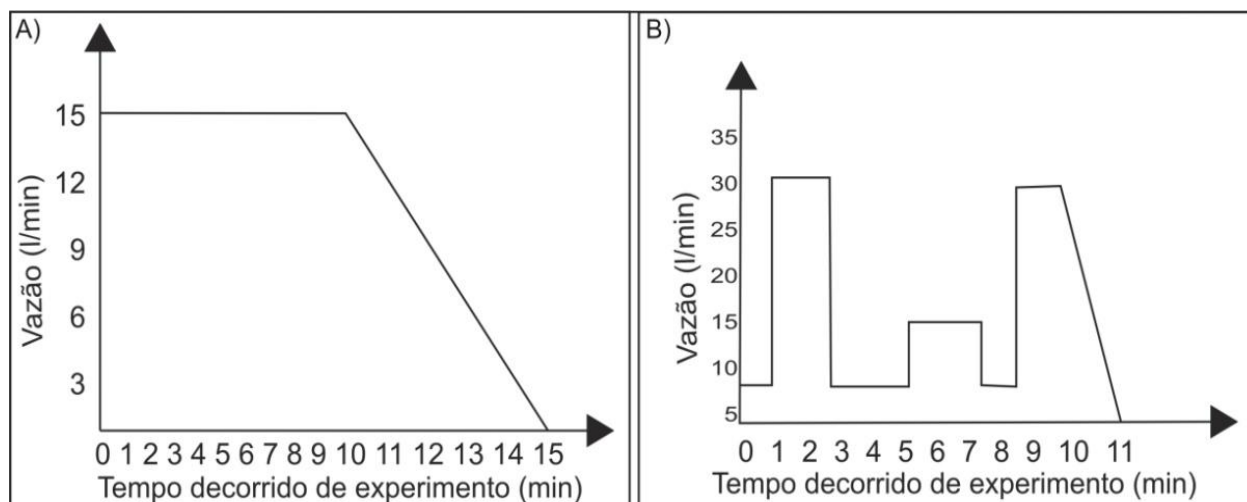
**Figura 2.5:** Fração granulométrica dos sedimentos utilizados nos experimentos.

Os parâmetros de variação das correntes de densidade simuladas foram a concentração e a vazão. Foram simuladas correntes de alta concentração (20%), com massa específica média  $1082 \text{ kg/m}^3$ , e correntes de baixa concentração (10%), com massa específica média  $1039 \text{ kg/m}^3$  (Tabela 2.2).

	Correntes de alta concentração (20%)			Correntes de baixa concentração (10%)		
Água ( $\text{kg/m}^3$ )	998			998		
Quantidade de água (l)	900			1900		
	Carvão	Ballotini	Caulim	Carvão	Ballotini	Caulim
Quantidade da mistura (l)	958	957,7	978,9	1958	1957,7	1978,9
Concentração em peso (%)	7,2	15,7	21	3,5	7,7	10,4
Concentração em volume (%)	6	6	8	3	3	4

**Tabela 2.2:** Dados experimentais das correntes de densidade de alta e baixa concentração.

Para cada concentração foram realizados experimentos com vazão constante e com vazão variada. Nos experimentos com vazão constante buscou-se manter a vazão em  $15 \text{ l/min}$  durante 10 minutos, diminuindo gradualmente nos 5 minutos finais (Figura 2.6A). Nos experimentos com vazão variada foram simulados três picos de vazão. No primeiro e no terceiro buscou-se manter a vazão em  $30 \text{ l/min}$ , e no segundo em  $15 \text{ l/min}$ , com duração de 2 minutos cada. Nos momentos de baixa vazão, buscou-se manter seu valor em  $7 \text{ l/min}$  (Figura 2.6B).



**Figura 2.6:** Comportamento previsto para a vazão nos experimentos com vazão A) Constante e B) variada.

Uma vez que a seção transversal do duto de alimentação da corrente foi mantida constante, inferiu-se que a relação entre as variações de vazão e de velocidade seriam diretamente proporcionais, segundo a seguinte equação:

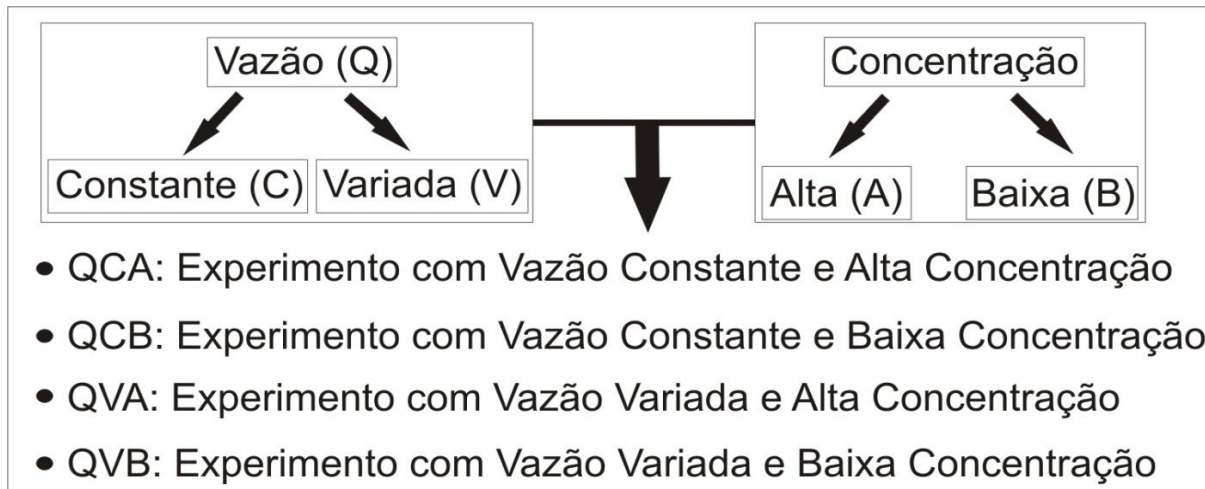
$$Q = VA \quad (\text{Equação 1})$$

onde: Q – vazão (l/min); V – velocidade (cm/s); A – área por onde o fluido passa (cm<sup>2</sup>).

Considerando um ponto de observação fixo, foram reproduzidos fluxos permanentes (*steady flows*) nos 10 minutos iniciais dos experimentos, quando as correntes escoaram com vazão constante e, portanto, as velocidades não variaram. Com a diminuição progressiva da vazão nos instantes finais dos experimentos, a velocidade foi reduzida ao longo do tempo (*waning flow*) (Kneller & Branney, 1995). Esses experimentos simularam correntes de densidade alimentadas por uma cheia fluvial inicialmente constante (*hyperpycnal flows*) e que posteriormente perdeu intensidade (Mulder & Alexander, 2001a).

Nos experimentos com vazão variada, a velocidade dos fluxos alterou-se ao longo do tempo, caracterizando um fluxo não-permanente ou transiente (*unsteady flow*). As correntes apresentaram momentos de diminuição (*waning flow*) e de aumento da velocidade (*waxing flow*) (Kneller & Branney, 1995). Nesse caso foram simuladas variações da vazão do rio em um regime de inundação. Os momentos de aumento da velocidade representam as cheias fluviais, enquanto que os momentos de diminuição de velocidade representaram as fases em que a inundação perdeu intensidade.

A nomenclatura de cada experimento foi determinada de modo que indicasse a vazão e a concentração da corrente (Figura 2.7).



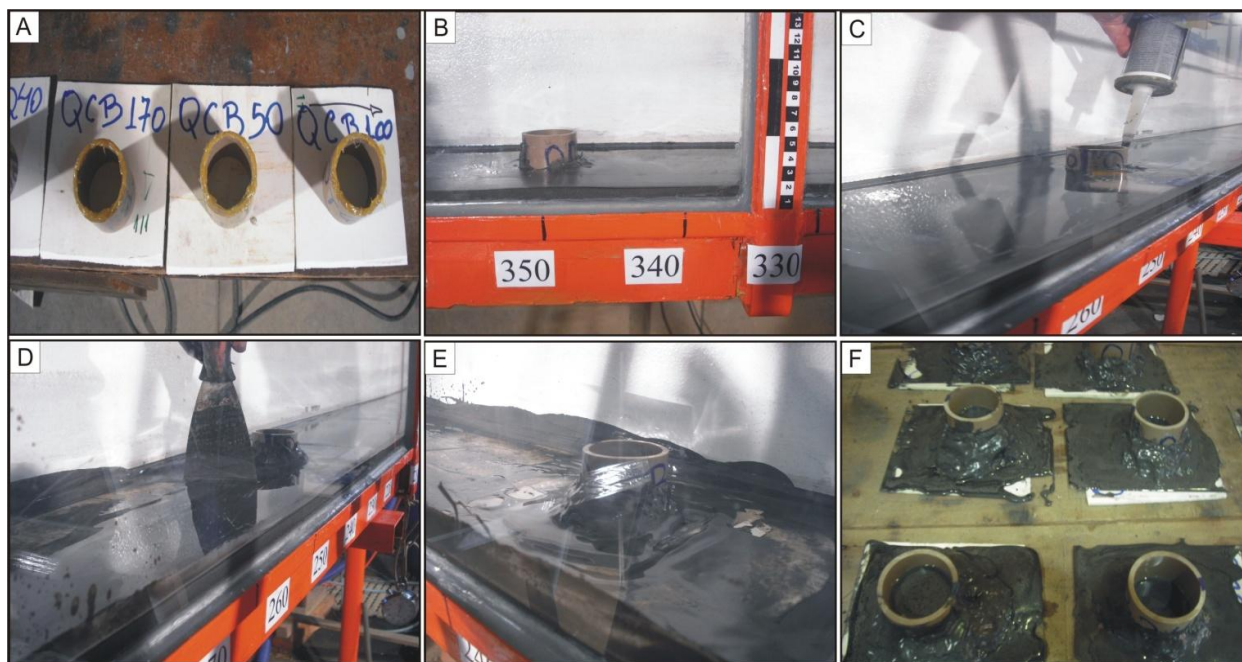
**Figura 2.7:** Nomenclatura dos experimentos de acordo com a vazão e concentração da corrente

Dois experimentos simularam correntes de densidade com alta concentração, um com vazão constante (Experimento QCA) e outro com vazão variada (Experimento QVA). Dois experimentos simularam correntes de densidade com baixa concentração, um com vazão constante (Experimento QCB) e outro com vazão variada (Experimento QVB).

O método de análise e tratamento dos dados foi determinado antes da execução das simulações físicas. Os dados obtidos com a sonda vectrino foram armazenados em um computador conectado ao equipamento. O número de dados gerado foi muito elevado e precisou ser filtrado, caso contrário não seria comportado e lido pelo *software* EXCEL®. Os dados provenientes do medidor de velocidade ultrassônico (UVP) foram armazenados e lidos em um sistema computacional próprio, através de um aplicativo de gerenciamento específico (UVP Monitor – versão 3.0). Esse aplicativo permitiu transformar os dados em formato *\*.txt*, o qual pode ser importado pelo *software* EXCEL®. Foram tratados, aproximadamente, 3000 dados obtidos com a sonda vectrino e 37450 dados obtidos com o equipamento UVP. Buscou-se identificar quais valores correspondiam a ruídos e quais valores correspondiam a informações relevantes para a análise. Posteriormente foram gerados gráficos e diagramas que facilitaram a interpretação dos mesmos.

Os vídeos obtidos com as filmagens dos experimentos e com o ecógrafo médico foram tratados e editados no *software* FINAL CUT PRO 6.0©. Os vídeos foram transformados em imagens, sendo geradas 61 fotografias a cada segundo. Para facilitar a análise, foi selecionada uma fotografia por segundo. Os parâmetros geométricos foram medidos diretamente dessas imagens, as quais também auxiliaram na caracterização dos parâmetros dinâmicos, e foram comparadas com os gráficos de velocidade e vazão das correntes de densidade. O intuito desse procedimento foi interpretar como os parâmetros geométricos, dinâmicos e cinemáticos das correntes de densidade interferiram no transporte e deposição dos sedimentos.

Amostras dos depósitos foram coletadas para cada experimento, com método de coleta adaptado de Manica (2009). A amostragem ocorreu a 50, 100, 170, 240, 350 e 400 cm da desembocadura. Antes do início de cada experimento foram fixadas folhas transparentes com 10 cm de comprimento e 13 cm de largura rente ao fundo do tanque. Tubos cilíndricos de PVC de 50 mm foram cortados com aproximadamente 5 cm de altura, sendo utilizados para a retirada de testemunhos dos depósitos. Em uma de suas bordas foi aplicada uma camada de graxa de alta viscosidade (Figura 2.8A). O intuito desse procedimento foi otimizar a fixação do tubo de PVC na folha transparente. Após aproximadamente 48 horas do final dos experimentos, os tubos de PVC com graxa foram inseridos nos locais de amostragem pré-estabelecidos e acima das folhas transparentes (Figura 2.8B). Posteriormente, uma espessa camada de silicone líquido foi aplicada ao redor dos tubos de PVC para evitar que o material contido em seu interior fluísse ou escapasse, mantendo-se preservado (Figura 2.8C). O material externo aos tubos de PVC foi removido com o auxílio de uma espátula (Figura 2.8D). Conseqüentemente, apenas o material amostrado permaneceu no tanque de experimentação (Figura 2.8 E). Placas rígidas e finas foram inseridas abaixo das folhas transparentes para a retirada das amostras, as quais secaram inicialmente ao ar livre (Figura 2.8 F) e posteriormente artificialmente, com o auxílio de uma estufa. As amostras foram retiradas do interior do tubo de PVC após estarem secas completamente.



**Figura 2.8:** Procedimentos utilizados para a coleta de amostras dos depósitos: A) Preparação de tubos de PVC de 50 mm com graxa em sua borda; B) Inserção do tubo de PVC no depósito nos locais de amostragem pré-estabelecidos; C) Aplicação de uma camada de silicone ao redor do tubo de PVC; D) Remoção do material localizado ao redor do tubo de PVC, com o auxílio de uma espátula E) Apenas as amostras permaneceram no tanque de experimentação; F) Secagem natural das amostras.

As amostras coletadas foram analisadas através de lâminas delgadas, confeccionadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências (IG), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Para a análise microscópica foram utilizados microscópios petrográficos da marca *Leica*, pertencentes ao Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia e Recursos Naturais (DGRN) da UNICAMP. As lâminas foram analisadas em termos de alguns critérios definidos por Tucker (2001), como a composição e a textura dos grãos do arcabouço (tamanho de grão, tipos de contato, empacotamento, esfericidade e arredondamento e grau de seleção).

O principal método de análise dos dados relacionou-se à abordagem Euleriana, a qual considera os dados ao longo do tempo em pontos fixos de observações (Kneller & Branney, 1995). A medição dos parâmetros geométricos foi realizada a partir de imagens provenientes do equipamento de ultra-som, das filmagens e de fotografias. A análise dos parâmetros cinemáticos foi realizada com base nos dados de velocidade obtidos com a sonda Vectrino e com o equipamento UVP. O método de análise relacionado à abordagem Langrangeana, a qual considera os dados ao longo do espaço (Kneller & Branney, 1995), foi utilizado na caracterização

dos depósitos. A correlação dos dados experimentais com dados extraídos do registro geológico e do monitoramento dos eventos naturais foi baseada em informações obtidas na literatura e na relação de escala dos números adimensionais.

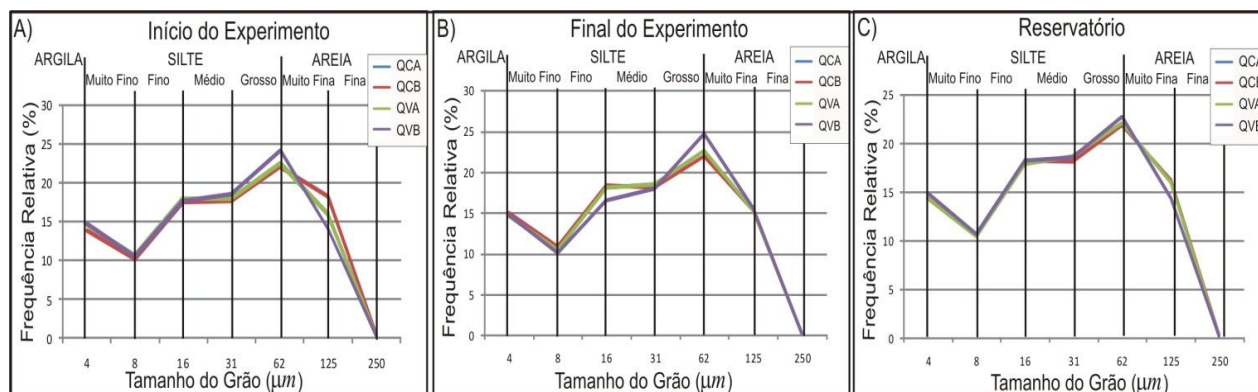
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O controle da massa específica (Tabela 3.1) e da distribuição granulométrica das correntes de densidade simuladas ocorreu através da análise das amostras da mistura coletadas no início e logo após o término de cada experimento, bem como diretamente do reservatório.

Experimento	Duração (min)	Concentração volumétrica (%)	Volume de mistura utilizado (l)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )			
				Prevista	Inicial	Final	Reservatório
QCA	14	20	185	1082	1090	1085	1100
QCB	15	10	196	1039	1040	1030	1070
QVA	10	20	192	1082	1090	1083	1095
QVB	10	10	191,49	1039	1040	1010	1040

**Tabela 3.1:** Dados experimentais, com ênfase à massa específica (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%, Baixa concentração = 10%).

As massas específicas medidas não foram muito diferentes da massa específica prevista. A amostra coletada do reservatório apresentou massa específica superior às demais. O mesmo ocorreu com a amostra coletada no início do experimento em relação à amostra coletada logo após o término do mesmo. As frações granulométricas seguiram padrão de distribuição similar nos três momentos de amostragem. A fração granulométrica areia fina foi mais abundante nas amostras coletadas diretamente do reservatório e no início dos experimentos (Figura 3.1).



**Figura 3.1:** Distribuição granulométrica das amostras coletadas no A) início e B) logo após o término de cada experimento, bem como C) diretamente do reservatório (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

As diferenças de massa específica e da distribuição granulométrica entre os três momentos de amostragem foram decorrentes da ineficiência do agitador elétrico presente no reservatório, que não conseguiu manter a mistura completamente homogênea e permitiu a deposição dos grãos mais grossos no decorrer dos experimentos. Esse fato foi confirmado com a observação do acúmulo de sedimentos no fundo do reservatório. Antes dos experimentos serem iniciados, foi realizada uma agitação manual da mistura, a fim de re-suspender os grãos previamente depositados.

Foram tomadas medidas da temperatura ambiente, do fluído presente no tanque e da mistura no reservatório antes do início de cada experimento a fim de verificar a influência da temperatura na diferença de massa específica entre as correntes simuladas e o fluído ambiente (Tabela 3.2).

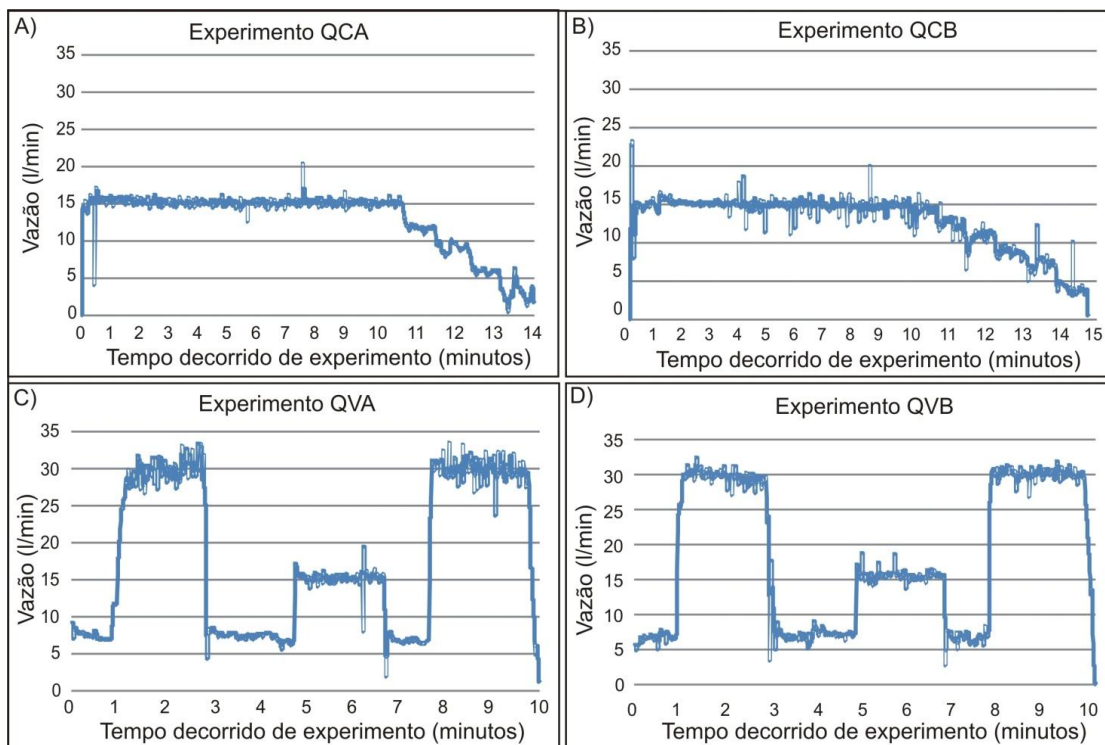
Experimento	Temperatura (°C)		
	Ambiente	Tanque	Reservatório
QCA	15,5	16,74	21
QCB	18	17	20
QVA	21,6	19	24
QVB	18,2	18	22

**Tabela 3.2:** Temperaturas medidas antes dos experimentos (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).



A temperatura medida no reservatório foi superior às demais devido à presença do agitador elétrico, o qual foi mantido constantemente em atividade e aqueceu a mistura. Porém, essa variação não foi suficiente para gerar a diferença de densidade entre os distintos fluidos dos experimentos. A principal causa de diferença de massa específica foi os sedimentos presentes na corrente, a qual possuía densidade superior à da água no tanque (*underflow*).

Todas as correntes de densidade simuladas foram de longa duração (*quasi-steady current*) (Mulder & Alexander, 2001a). O monitoramento contínuo da vazão instantânea evidenciou comportamento similar ao planejado. Porém, o comportamento da vazão oscilou em determinados momentos no decorrer dos experimentos, o que foi representado pela diminuição ou aumento da vazão desejada. Esse comportamento foi decorrente de entupimentos parciais no circuito de alimentação ou devido à sensibilidade do equipamento controlador da vazão (Figura 3.2).



**Figura 3.2:** Comportamento da vazão durante as simulações físicas A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

Devido ao elevado número de dados captados por minuto, foram determinados os valores de vazão média nos intervalos de tempo pré-estabelecidos para cada experimento, além da vazão inicial (Tabela 3.3). Essas informações auxiliaram na análise dos parâmetros geométricos e cinéticos das correntes, bem como na caracterização dos depósitos gerados.

A) Experimento	Vazão inicial (l/min)	Vazão média (l/min) em determinados intervalos de tempo						
		Tempo (min)	0 a 10	10 a 11	11 a 12	12 a 13	13 a 14	14 a 15
QCA	14,1	Vazão	15,12	11,4	8,8	5,33	2,93	-
QCB	12,0	Vazão	14,00	12,08	10,56	8,64	6,97	4,03
B) Experimento	Vazão inicial (l/min)	Vazão média (l/min) em determinados intervalos de tempo						
		Tempo (min)	0 a 1	1 a 3	3 a 5	5 a 7	7 a 8	8 a 10
QVA	9,0	Vazão	7,89	28,75	7,54	14,94	7,9	28,47
QVB	4,9	Vazão	6,66	29,43	7,76	15,49	6,77	28,81

**Tabela 3.3:** Vazão média no decorrer do tempo de experimento (min) com vazão: A) contínua e B) variada (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

### 3.1. PARÂMETROS DINÂMICOS, GEOMÉTRICOS E CINEMÁTICOS DA CORRENTE

A dinâmica dos fluxos gravitacionais pode ser bem explicada pelo número de Reynolds, o qual expressa a razão entre as forças de inércia do fluxo, as quais promovem a turbulência, com as forças viscosas do fluxo, as quais suprem a turbulência:

$$Re = \frac{uh\rho}{\mu} \quad (\text{Equação 2})$$

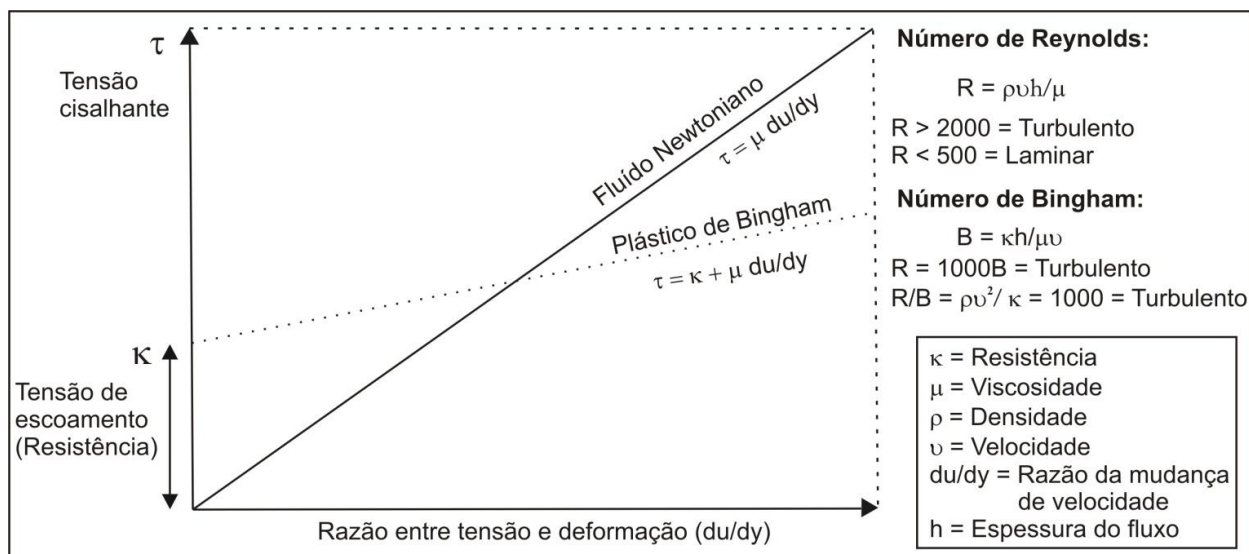
onde:  $u$  - velocidade do fluxo ( $LT^{-1}$ );  $h$  - a altura do fluxo (L);  $\rho$  - massa específica do fluxo ( $ML^{-3}$ );  $\mu$  - viscosidade dinâmica do fluxo ( $ML^{-1}T^{-1}$ ).

Fluxos que possuem número de Reynolds menor do que 500 apresentam comportamento reológico laminar ou viscoso, enquanto que fluxos com número de Reynolds maior que 2000 apresentam comportamento turbulento. Fluxos com número de Reynolds entre esses dois valores possuem comportamento de transição entre laminar e turbulento.

O fluxo laminar ou viscoso é caracterizado pela trajetória retilínea das partículas e pelo movimento em massa. Possui como principal mecanismo de suporte a matriz coesiva. A deposição dos sedimentos ocorre por congelamento, quando a tensão de cisalhamento fica abaixo da tensão de resistência (Shanmugam, 2000).

O fluxo turbulento possui baixa viscosidade. Possui como principal mecanismo de suporte dos grãos o componente ascendente da turbulência. A deposição ocorre devido à desaceleração paulatina da corrente, sendo iniciada com areias depositadas por tração e finalizada com pelitos depositados por tração e suspensão. As correntes de turbidez de alta densidade incluem todos os tamanhos de grãos. A deposição ocorre quando a diminuição de energia impede o transporte dos grãos maiores. Ou seja, quando a velocidade ascendente da turbulência é menor do que a velocidade de queda do grão (Ávila, 2003).

O número de Reynolds é aplicado para fluídos Newtonianos, os quais possuem viscosidade constante enquanto são submetidos a uma tensão de cisalhamento. A taxa de deformação a que são submetidos é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento aplicada sobre eles. Esses fluxos são representados pelas correntes de turbidez. Os fluídos não-Newtonianos apresentam viscosidade variável em função da taxa de deformação a que são submetidos. Se a viscosidade diminui com taxas de deformação crescentes, os fluídos são denominados pseudoplásticos. Os fluídos que se comportam como um sólido até que uma tensão de resistência seja excedida e, a partir deste ponto, passam a apresentar uma viscosidade constante são denominados de plásticos ou Binghamiano. Esses fluxos são representados pelos fluxos de detritos (Shanmungan, 2000; Guirro, 2008) (Figura 3.3).

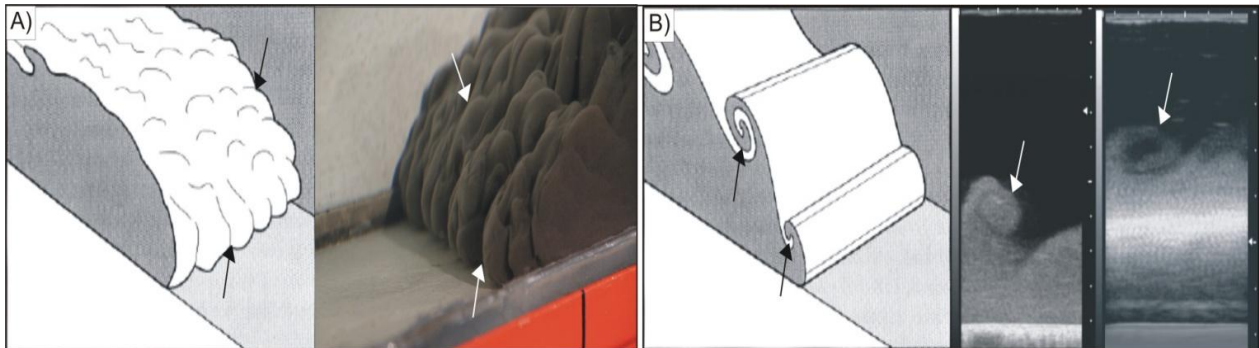


**Figura 3.3:** Reologia para os fluxos Newtonianos e não-Newtonianos. Modificado de Shanmungan (2000)

A geometria do fluxo turbulento pode ser representada pela cabeça, corpo e, às vezes, cauda. A cabeça corresponde ao principal local de erosão de material (Middleton, 1966b). O fluxo em seu interior é muito instável devido à forte resistência e incorporação do fluido ambiente, ao desprendimento de vórtices e à influência do corpo. O fluxo do corpo exerce pressão no fluxo na cabeça, o qual incorpora fluido proveniente do corpo e da cauda (Middleton, 1993). A entrada do fluido ambiente na cabeça e no corpo ocorre através de fendas presentes na cabeça (Figura 3.4A). O desprendimento de vórtices de Kelvin-Helmholtz acontece atrás da cabeça devido à grande intensidade de mistura entre o fluido ambiente e o fluxo (Figura 3.4B) (Simpson & Britter, 1979; Middleton, 1993).

O corpo da corrente corresponde ao local preferencial de deposição dos sedimentos (Kneller & Buckee, 2000), sendo dividido em uma parte densa basal e outra superior turbulenta (fluxo bipartido), onde ocorre a mistura com o fluido ambiente (Simpson & Britter, 1979). A espessura da cauda da corrente diminui rapidamente, tornando-se mais diluída e depositando os sedimentos finos assim que o fluxo vai desaparecendo. A camada inferior dos fluxos bipartidos é conhecida como camada de tração, fluxo inercial ou subcamada viscosa. Essa parte basal é caracterizada pela alta concentração de sedimentos, pelo comportamento reológico pseudoplástico e pelo fluxo laminar. A camada diluída superior é sustentada pela força motriz de empuxo na interface da camada superior e inferior do fluxo. Essa parte superior (baixa densidade) é caracterizada pela

menor concentração de sedimentos, comportamento reológico newtoniano e fluxo turbulento (Postma *et al.*, 1988).



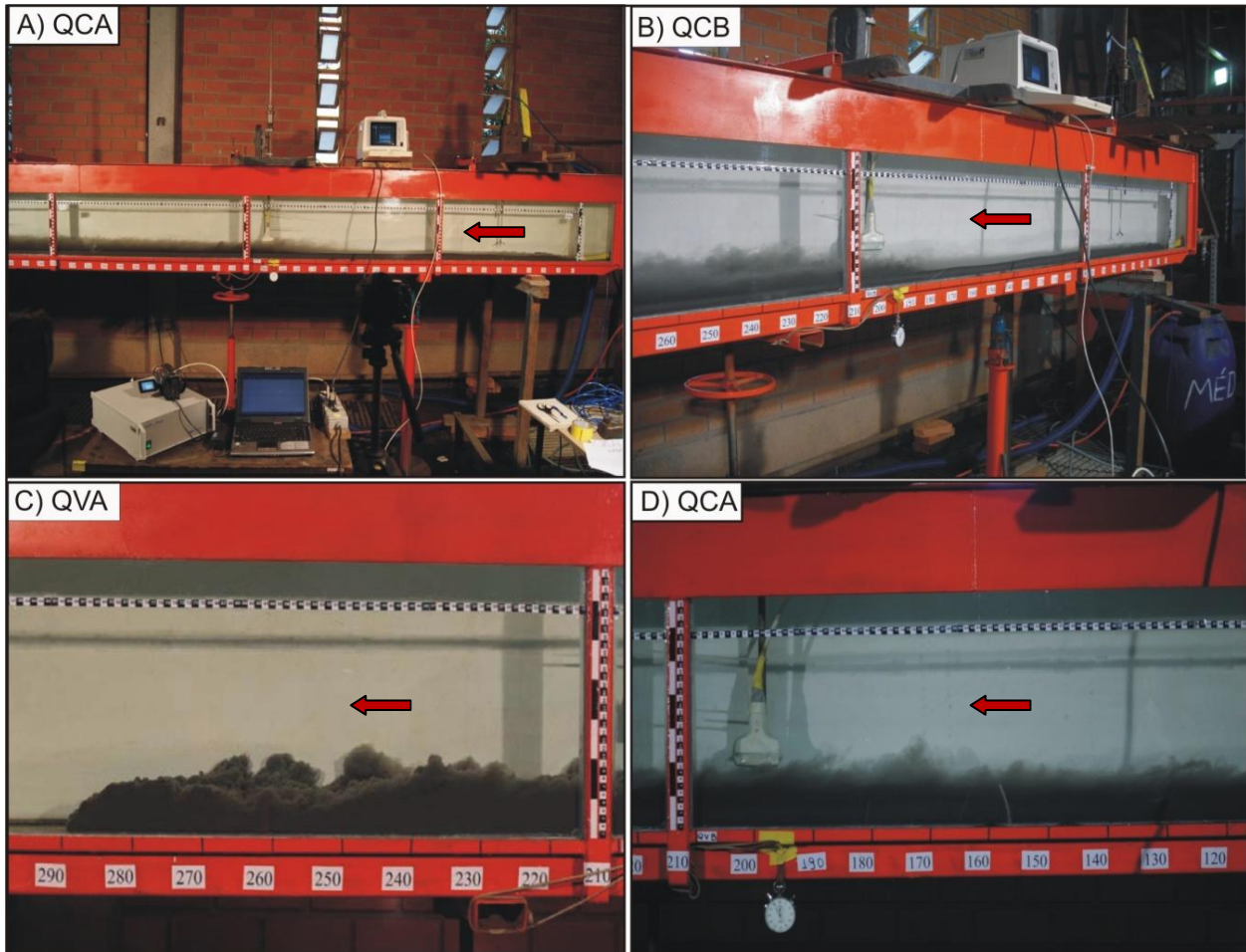
**Figura 3.4:** Geometria das correntes de densidade A) Fendas que se desenvolvem no limite da cabeça da corrente; B) Instabilidade de Kelvin-Helmholtz (vórtices). Modificado de Simpson (1987). Comparação com os experimentos realizados.

### 3.1.1. DINÂMICA DA CORRENTE

Os experimentos realizados apresentaram fluxos bipartidos logo no início, tanto para as correntes de alta concentração (20%) como para as correntes de baixa concentração (10%). Os fluxos possuíam uma porção basal composta por um fluido mais denso, concentrado, com maior coesão e viscosidade (fluxo laminar). A porção superior apresentou baixa concentração e viscosidade (fluxo turbulento). Porém, a intensidade e o desenvolvimento da porção superior turbulenta variaram no decorrer do tempo e espaço. Na região bem proximal e final do tanque de experimentação a turbulência foi mais intensa em comparação com a região inicial/intermediária, tanto para as correntes de alta concentração como para as correntes de baixa concentração.

Esse comportamento foi decorrente das transformações do fluxo durante o seu desenvolvimento, devido às interações com o fluido ambiente e às perturbações internas das correntes (tratadas no subitem 3.2.5). Os escoamentos foram produzidos por gravidade e apresentaram características de fluxos bipartidos na região bem proximal do tanque. Durante o desenvolvimento do fluxo ocorreu a mistura entre o fluido ambiente e a camada turbulenta superior, o que ocasionou a diminuição da intensidade da turbulência na região inicial/intermediária do tanque. Perturbações internas do fluxo ocasionaram a re-suspensão dos sedimentos mais finos e favoreceram o desenvolvimento da porção superior turbulenta na porção intermediária/final do tanque (Figura

3.5). Esse comportamento influenciou nos parâmetros geométricos e cinemáticos das correntes, uma vez que os dados das medidas de altura e de velocidade da corrente foram captados em posição fixa no tempo e espaço.



**Figura 3.5:** Fluxo bipartido caracterizado pela porção basal densa e porção superior turbulenta. Desenvolvimento da corrente com a porção superior mais turbulenta na região intermediária/final do tanque em comparação com a região inicial/intermediária, onde a porção superior é mais diluída. A seta vermelha indica o sentido das correntes. A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

O aumento da concentração e a presença dos sedimentos coesivos favoreceram o comportamento reológico pseudoplástico e reduziram a turbulência do fluxo. Tal fato pode ser bem explicado pelo número de Reynolds (equação 2), o qual determina que as variações da viscosidade dinâmica e da concentração do fluxo são diretamente proporcionais. Portanto, devido ao aumento

da concentração do fluxo, a sua viscosidade dinâmica aumentou. Conseqüentemente, o número de Reynolds diminuiu e favoreceu o desenvolvimento do fluxo laminar.

A 200 cm da desembocadura, onde as imagens de ultra-som foram captadas, os fluxos com alta concentração comportaram-se em algumas partes do tempo como uma massa/bloco (*debris flow*), com a porção superior se comportando como um fluxo laminar diluído ou uma nuvem secundária com baixa turbulência. A diminuição da intensidade da turbulência foi decorrente da alta concentração, da presença de sedimentos coesivos e da mistura do fluido ambiente com a camada superior da corrente. Na parte externa do *debris flow* ocorreu diluição/incorporação do fluido ambiente, o que ocasionou a geração da nuvem secundária na porção superior da corrente.

A taxa de turbulência durante o transporte e deposição dos fluxos bipartidos é alvo de debate na literatura. Muitos estudos envolvendo simulação física classificaram como correntes de turbidez de baixa concentração as correntes com concentrações de até 27,5%. Correntes com concentração entre 27,5% e 44% foram classificadas como correntes de turbidez de alta concentração (Middleton, 1967; Hallworth & Huppert, 1998). Mulder & Alexander (2001a) classificaram os fluxos com até 9% de concentração, o chamado limite de Bagnold, como correntes plenamente turbulentas. Os fluxos com concentração entre 9% e 27,5% foram classificados como correntes parcialmente turbulentas, as quais correspondem às correntes de turbidez de alta densidade no senso de Lowe (1982). O limite de Bagnold foi definido com base nos conceitos físicos de sedimentação. Nos fluxos com concentração de sedimento inferior a 9%, a colisão entre os grãos seria uma questão meramente probabilística, podendo ocorrer ou não. O mecanismo de sustentação dos grãos seria exclusivamente a componente ascendente da turbulência. Nos fluxos com concentração de sedimentos superior a 9%, a colisão entre os grãos seria uma certeza física. A pressão dispersiva, resultante destas colisões, seria outro mecanismo de sustentação atuante (Bagnold, 1962; Guirro, 2008).

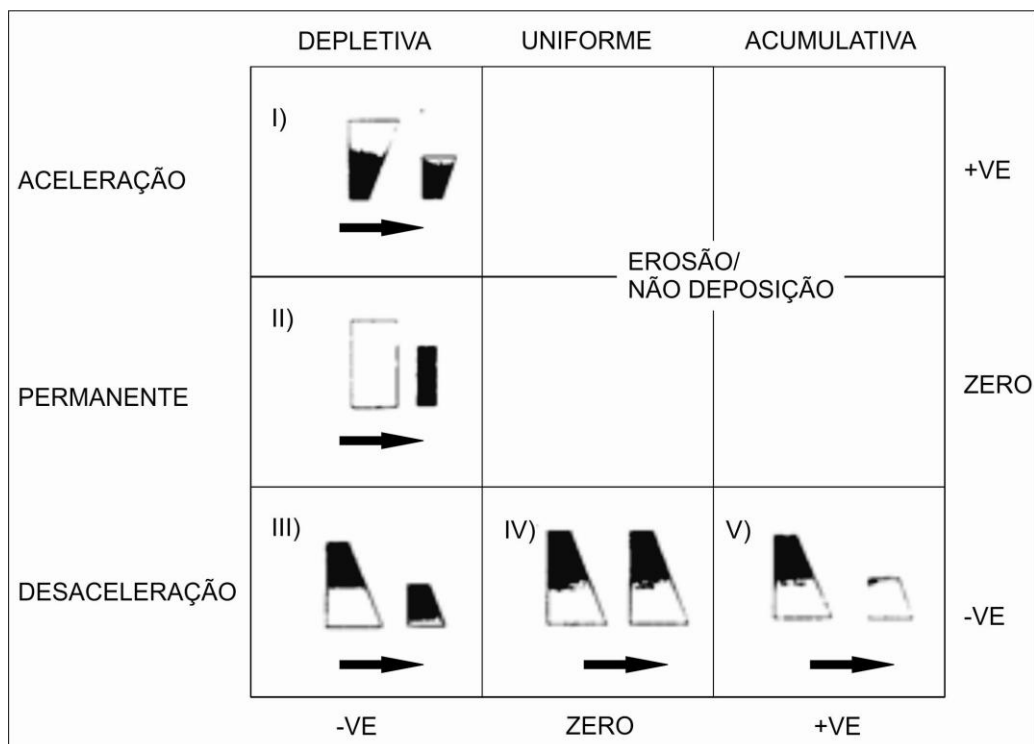
Outros estudos de correntes de densidade classificaram fluxos com concentrações entre 36 e 66% como *debris flow*. Estes fluxos são caracterizados pelo comportamento coesivo e fluxo laminar predominante da camada basal, a qual é sobreposta por uma nuvem secundária composta por sedimentos finos. O predomínio do comportamento pseudoplástico não é decorrente apenas da alta concentração dos sedimentos, mas também em razão da presença de grãos coesivos misturadas aos grãos mais grossos (Hampton, 1972; Kneller & Branney, 1995; Mohrig *et al.*, 1998, 1999; Kneller & Buckee, 2000; Marr *et al.* 2001; Mohrig & Marr, 2003; Manica, 2009).



As concentrações dos sedimentos utilizadas nos experimentos desta pesquisa foram de 10 e 20%, o que, teoricamente, caracterizam os fluxos turbulentos. Porém, vale ressaltar que essas concentrações correspondem aos valores previstos. Na prática houve uma pequena variação nas massas específicas previstas. Com base nas informações obtidas na literatura, concluiu-se que as correntes simuladas representam correntes de turbidez de alta densidade, as quais são caracteristicamente bipartidas.

Kneller (1995) desenvolveu um estudo com o objetivo de relacionar as características dinâmicas das correntes com os seus respectivos depósitos. Este estudo buscou explicar como as camadas de arenitos maciços e/ou com inversão granulométrica são formadas em ambiente marinho profundo. Para explicar as diferenças no arranjo interno das camadas foram utilizadas equações de movimento. As correntes de densidade foram classificadas de acordo com a sua viscosidade, distância percorrida e tempo de duração. Essas correntes geram depósitos com características específicas: i) fluxos depletivos acelerados formam depósitos com gradação inversa, que são associados ao incremento local da velocidade do fluxo ou à formação de ondas internas no interior do fluxo. As frações granulométricas e espessuras do depósito tendem a diminuir nas porções distais do depósito; ii) fluxos depletivos permanentes originam depósitos maciços, com diminuição de espessura e frações granulométricas nas porções distais; iii) fluxos depletivos desacelerados originam depósitos com gradação normal, tipo seqüência de Bouma, e com diminuição de espessura e das frações granulométricas em direção à porção distal da bacia; iv) fluxos uniformes desacelerados geram depósitos com gradação normal, sem variação de suas características nas porções mais distais (características de ondas solitárias); v) fluxos acumulativos desacelerados originam depósitos com gradação normal, com aumento das frações granulométricas e diminuição da espessura da camada em direção à porção distal da bacia (Figura 3.6).





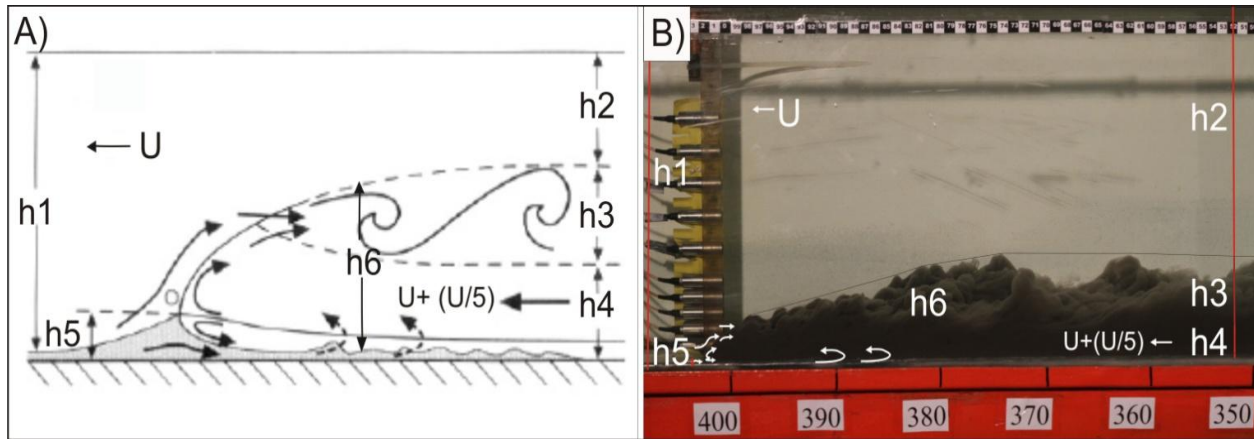
**Figura 3.6:** Relação entre as características dinâmicas das correntes de turbidez e seus depósitos.  $V_e$  significa velocidade, podendo ser positiva (+ $V_e$ ; waxing flow) ou negativa (- $V_e$ ; waning flow). Modificado de Kneller (1995).

As correntes simuladas nesta pesquisa podem ser consideradas correntes de turbidez depletivas desaceleradas, segundo a classificação de Kneller (1995), quando disparadas à vazão constante. Portanto, inferiu-se que os depósitos gerados apresentariam gradação normal, com de sua espessura e diminuição das frações granulométricas em direção a porção distal.

As correntes disparadas com vazão variada foram classificadas como depletivas e não – permanentes. Em certos momentos ocorreu aumento da velocidade (aceleração da corrente nos picos de vazão) e em outros momentos ocorreu a diminuição da velocidade (desaceleração da corrente com diminuição da vazão). Portanto, os depósitos gerados nos experimentos com vazão variada e com vazão constante foram diferentes.

### 3.1.2. ALTURA DA CORRENTE

A medição dos parâmetros geométricos da corrente foi feita a partir de imagens provenientes do equipamento de ultra-som e da observação dos fluxos a partir das filmagens. A análise de tais imagens permitiu a medição da altura do nariz, altura do corpo e altura da cabeça das correntes. A altura do nariz foi definida na superfície frontal inferior da corrente. A altura do corpo foi definida pela distância entre o fundo do tanque e a interface entre o corpo e a zona de mistura. A altura da corrente foi definida como a distância entre o fundo do tanque e a interface da maior altura da cabeça da corrente (Figura 3.7A,B).



**Figura 3.7:** A) Seção da corrente com parâmetros geométricos: h1 altura total do fluido ambiente, h2 altura do fluido ambiente acima da corrente, h3 zona de mistura, h4 altura do corpo, h5 altura do nariz da corrente, h6 altura da cabeça da corrente,  $U$  velocidade. Modificado de Simpson (1987). B) Comparação com os experimentos realizados.

Vale ressaltar que, em todos os experimentos, a vazão não foi mantida absolutamente constante nos estágios iniciais de escoamento do fluxo. Tal fato foi decorrente da dificuldade de se estabilizar a vazão logo que o registro foi aberto, o que foi confirmado com a análise dos gráficos de variação da vazão. Conforme foi exposto, correntes com vazões mais elevadas desenvolvem velocidades maiores (Equação 1). Sendo assim, inferiu-se que os valores de velocidade e vazão mais elevados favoreceriam o aumento do número de Reynolds e o desenvolvimento do fluxo turbulento (Equação 2).

Nos experimentos com vazão constante, a altura do nariz da corrente de menor concentração foi superior ao da corrente de maior concentração. Esse comportamento não foi influenciado pela variação da vazão, uma vez que a vazão inicial do experimento QCB e do experimento QCA não foram muito diferentes. Esse comportamento foi coerente com o que é estabelecido pelo número de Reynolds (Equação 2). Conforme a concentração do fluxo foi reduzida, o seu comportamento tendeu a ser mais turbulento e a altura do nariz da corrente tendeu a ser maior. Nos experimentos com vazão variada, essa relação foi inversa. A vazão inicial do experimento QVB (4,9 l/min) foi muito inferior à vazão inicial do experimento QVA (9 l/min). Quanto menor a vazão, menor a velocidade e a altura desenvolvida pela corrente, o que justifica a altura inferior do nariz na corrente de baixa concentração (Tabela 3.4).

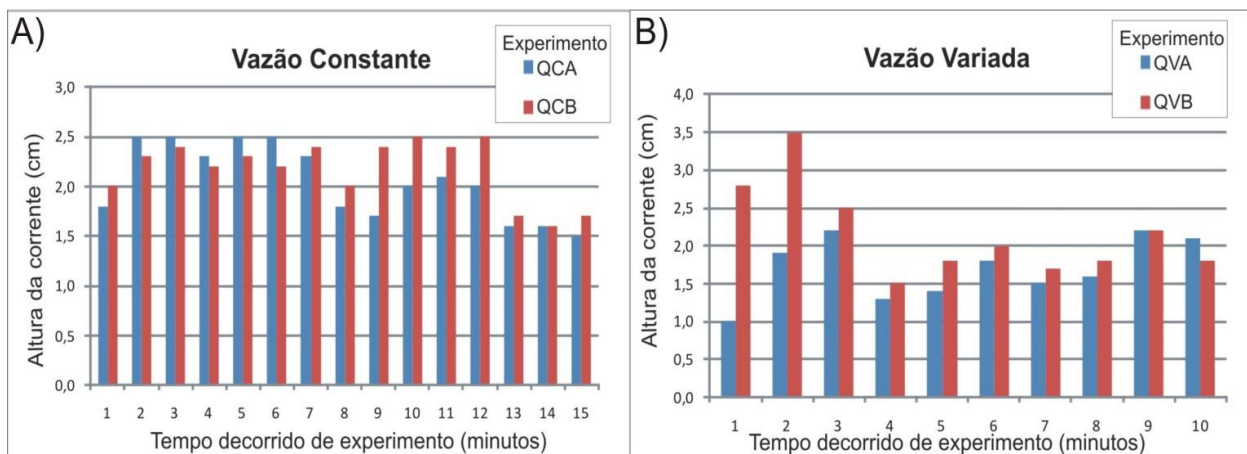
Em todos os experimentos, a altura da cabeça das correntes de alta concentração foi superior ao das correntes de baixa concentração. Esse comportamento foi explicado pela variação da vazão de escoamento dos fluxos. A vazão média no primeiro minuto dos experimentos de alta concentração foram superiores à dos experimentos de baixa concentração. Conseqüentemente, a velocidade média e a taxa de turbulência foram superiores, o que ocasionou o maior desenvolvimento da altura da cabeça das correntes de alta concentração (Tabela 3.4).

	<b>Altura do nariz (cm)</b>	<b>Altura da cabeça (cm)</b>	<b>Vazão Inicial (l/min)</b>	<b>Velocidade média no primeiro minuto (l/min)</b>
<b>QCA</b>	0,7	10	14,1	15,14
<b>QCB</b>	1	8	11,75	14,7
<b>QVA</b>	0,55	7,7	9	7,89
<b>QVB</b>	0,35	5	4,9	6,66

**Tabela 3.4:** Alturas medidas do nariz e da cabeça das correntes (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

A maior intensidade das vazões e das velocidades ocasionou uma maior força de resistência do fluído ambiente. O desenvolvimento da altura da corrente foi favorecido devido a essa ação de reação da água ambiente. Esse comportamento também foi constatado nas simulações físicas realizadas por Alexander & Mulder (2002).

Nos experimentos com correntes disparadas a vazão constante, a altura média do corpo da corrente foi de 2,0 cm para o fluxo de alta concentração e 2,3 cm para o fluxo de baixa concentração. Nos experimentos com correntes disparadas a vazão variada, a altura média da corrente foi de 1,7 cm para o fluxo de alta concentração e 2,2 para o fluxo de baixa concentração (Figura 3.8). O padrão de variação da altura do corpo ao longo do tempo evidenciou que quanto maior a concentração da mistura, menor a altura do corpo da corrente. Esse comportamento foi explicado pelo número de Reynolds. O aumento da concentração do fluxo ocasionou a diminuição da intensidade da turbulência e das alturas desenvolvidas pelo corpo da corrente.



**Figura 3.8:** Altura do corpo das correntes nos experimentos com vazão A) constante e B) variada (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

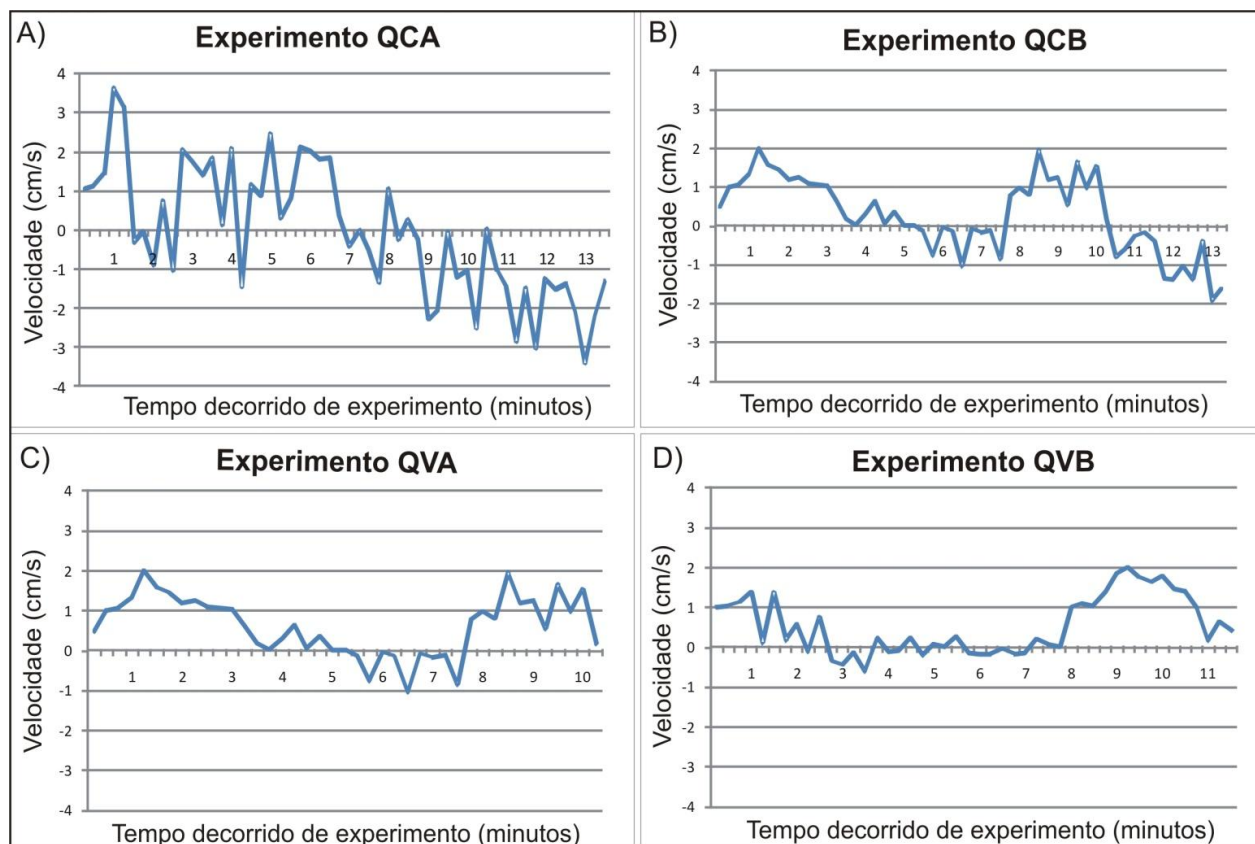
A diminuição das alturas conforme o aumento da concentração foi atribuída à liberdade de movimentação dos grãos dentro da corrente. Os fluxos menos concentrados possuíam menor quantidade de sedimento em seu interior. As partículas ao colidirem encontraram mais “espaço” para se movimentar devido à maior quantidade de fluido entre os grãos. Conseqüentemente os fluxos se expandiram. Os fluxos mais concentrados possuíam maior quantidade de sedimento, ou menor quantidade de fluido entre os grãos. A quantidade de choque entre as partículas aumentou, não permitindo grande expansão dos fluxos e ocasionando a diminuição da altura das correntes (Ávila, 2003). A elevada concentração de caulim aumentou a coesão do fluxo, favorecendo a atuação de forças viscosas. Os mecanismos de suporte dos grãos foram influenciados pela matriz coesiva, a qual impediu o desenvolvimento de maiores alturas da corrente.

A espessura da cabeça foi superior à das demais partes da corrente devido à resistência imposta pelo fluido ambiente. À medida que a corrente avançou, o fluido ambiente foi deslocado e acelerado, exercendo resistência à corrente. Essa resistência foi mais intensa do que a resistência junto ao fundo e à interface. A altura da cabeça se desenvolveu para compensar essa força. O restante do fluxo possuiu resistência junto ao fundo e à interface, gerando altura menos elevada. Esse mesmo comportamento foi observado por Middleton (1993).

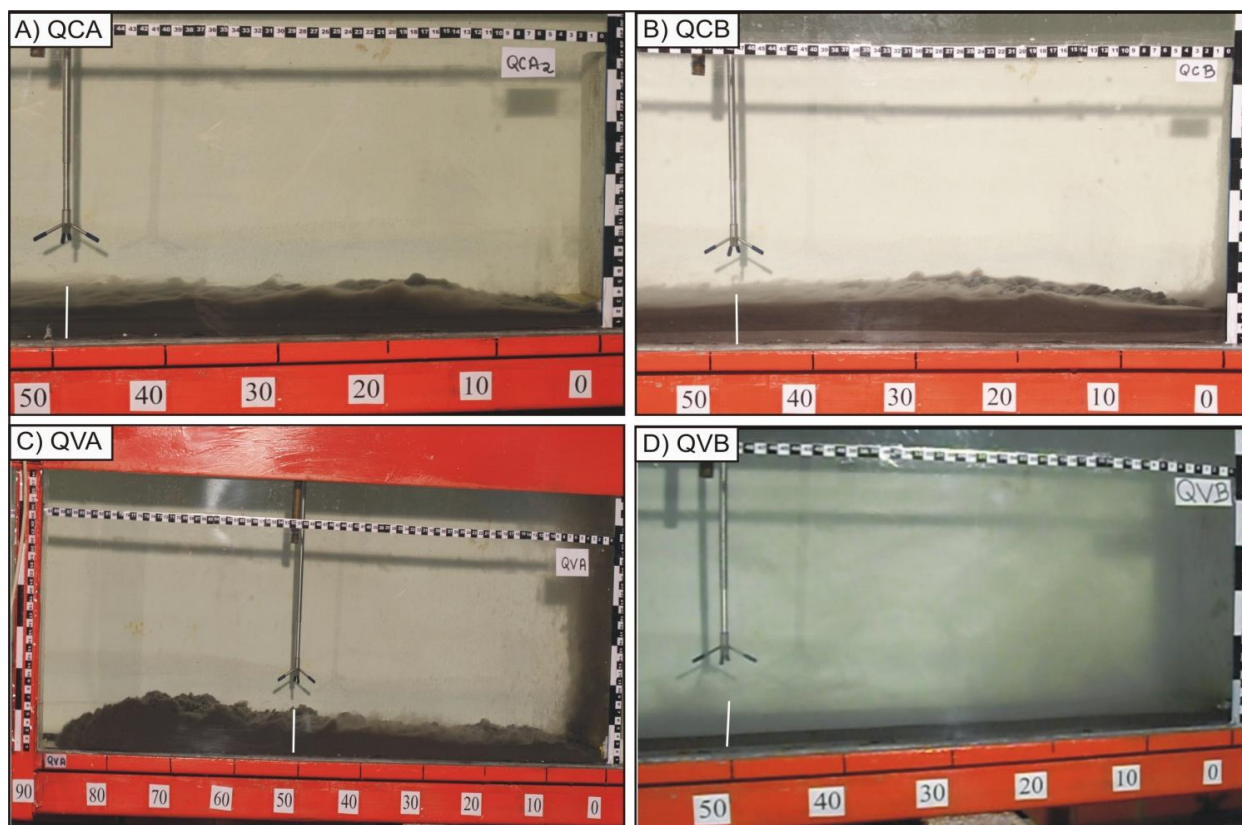
### **3.1.3. VELOCIDADE DA CORRENTE**

A análise dos parâmetros cinemáticos foi realizada com base nos dados obtidos com a sonda Vectrino, situada a 50 cm da desembocadura, e com o equipamento UVP, situado a 405 cm da mesma. Devido ao elevado número de dados, foram considerados os valores médios de velocidade a cada 25 s de experimento.

As medidas das velocidades das correntes obtidas com a sonda Vectrino (Figura 3.9) apresentaram forte influência da resistência do fluido ambiente. O trecho inicial do tanque foi caracterizado por uma desaceleração da corrente associada à diminuição da concentração da mistura devido a elevada taxa de deposição. Devido à posição de coleta dos dados e às alturas desenvolvidas pelas correntes (Figura 3.10), os valores de velocidade corresponderam à porção superior do fluxo.



**Figura 3.9:** Velocidades médias das correntes de densidade, medidas a 50 cm da desembocadura e 5 cm do fundo do tanque no decorrer do experimento (sonda Vectrino) A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).



**Figura 3.10:** A altura desenvolvida pela corrente variou durante o seu escoamento, bem como a intensidade da turbulência. Essas variações agregaram ruídos aos dados. Destaque à posição de aquisição dos dados. Fotografias obtidas em diferentes momentos do desenvolvimento do fluxo. A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

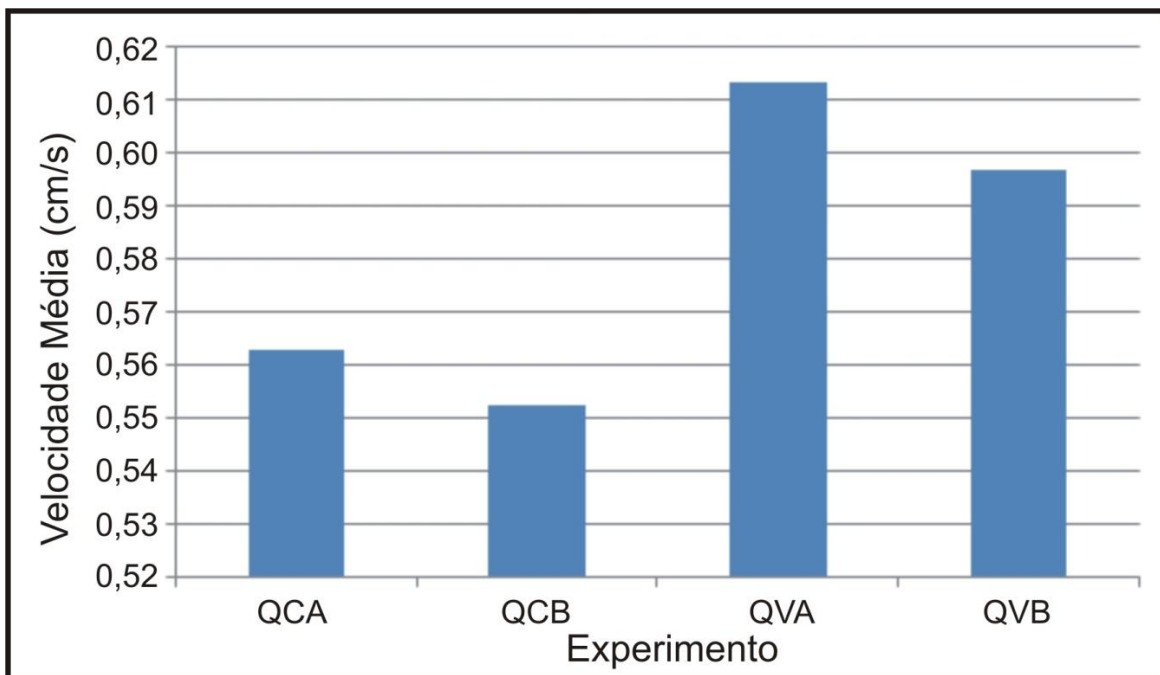
A corrente do experimento QCA (Figura 3.9A) apresentou nos dez minutos iniciais distintos picos positivos e negativos de velocidade. Tal fato é decorrente da posição do equipamento, cujo ponto de aquisição dos dados estava localizado a uma altura ora inferior e ora superior à altura da corrente (entre 7 e 1,4 cm) (Figura 3.10A). Conseqüentemente, foi favorecida a interferência de ruídos nos dados de velocidade da corrente, referentes ao deslocamento do fluído ambiente.

A altura da corrente de baixa densidade (entre 8 e 1,6 cm) (Figura 3.10 B) disparada a uma vazão constante foi maior em comparação à altura da corrente de alta densidade. Os dados obtidos apresentaram um comportamento mais homogêneo (Figura 3.9B), evidenciando uma menor influência dos ruídos. Nos dois casos, quando a vazão foi reduzida, a velocidade diminuiu (Equação 1).

As correntes iniciadas com vazão variada apresentaram comportamento de velocidade semelhante à variação da vazão (Figura 3.9C, D). Quando a vazão era mais elevada, as velocidades registradas eram maiores. Os dados obtidos apresentaram menor influência de ruídos, ao contrário dos momentos em que a vazão era baixa e a altura da corrente menor (Figura 3.10C, D).

O gráfico correspondente às velocidades médias de todos os experimentos está apresentado a seguir (Figura 3.11). Os dados obtidos no experimento QCA apresentaram grande influência dos ruídos, principalmente nos 5 min finais de experimento quando a vazão reduzida (Figura 3.9A). Para que os valores de velocidade média não fossem negativos, foram considerados os dados obtidos nos 10 min iniciais. Apesar da interferência dos ruídos ter sido menor no experimento QCB, também foram considerados os dados nos 10 min iniciais. Esse procedimento ocorreu para permitir uma comparação mais confiável entre os valores de velocidade média desses experimentos.

Os demais dados de velocidade (experimentos QVA e QVB) foram mais confiáveis. A interferência dos ruídos foi menor, gerando valores de velocidade média positivos. Nesse caso, foi considerada a velocidade média durante todo o tempo de duração dos experimentos.

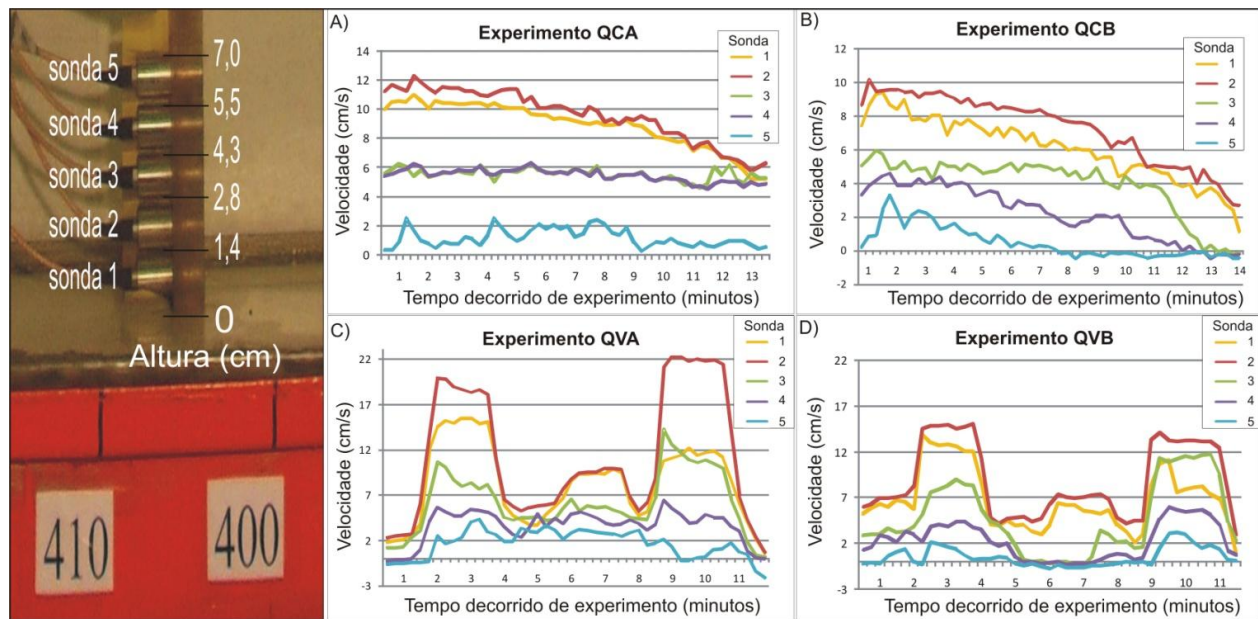


**Figura 3.11:** Velocidades médias das correntes de densidade(QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%.



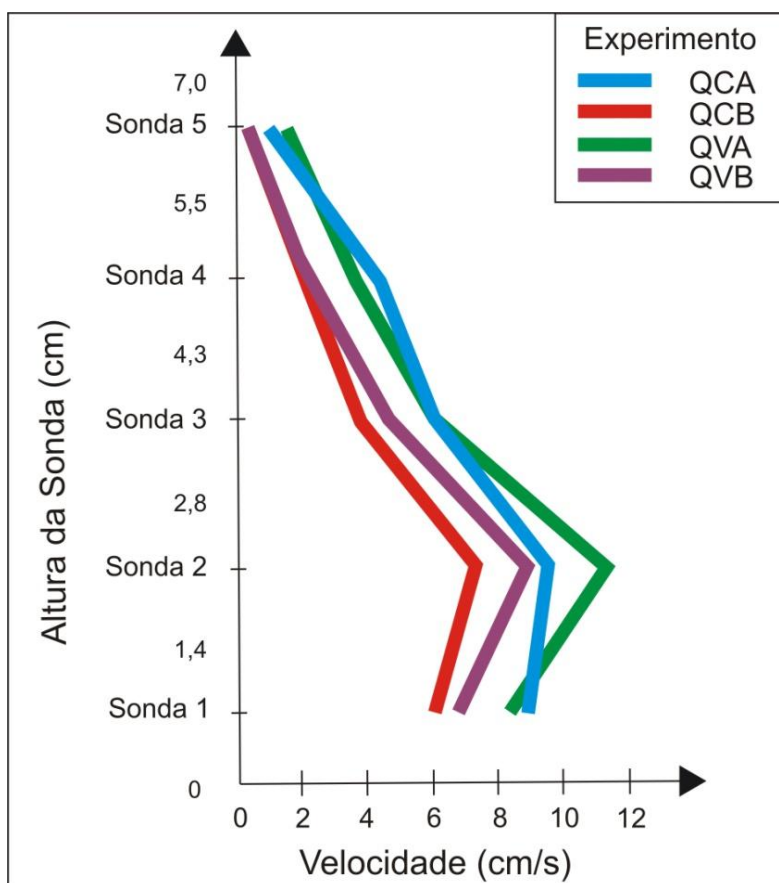
As correntes de alta concentração apresentaram menor altura e velocidade média maior do que as correntes de baixa concentração. Esse comportamento foi coerente, uma vez que o aumento da concentração fez com que a turbulência fosse menos desenvolvida e o maior excesso de densidade implicou no aumento da velocidade.

Os outros dados de velocidade, obtidos no final do tanque de experimentação com o equipamento UVP, caracterizaram a variação vertical de velocidade do fluxo em função do tempo, a qual foi influenciada pela estratificação vertical de concentração dos sedimentos. A porção inferior foi caracterizada pela maior concentração de sedimentos, sendo mais espessa nas correntes de alta concentração em comparação às correntes de baixa concentração. Portanto, a maior concentração implicou no aumento da quantidade de sedimentos na parte basal da corrente. O fluxo laminar basal (sondas 1 e 2) apresentou velocidade maior do que a porção superior (sondas 3, 4 e 5), a qual foi caracterizada por uma nuvem de sedimentos de baixa concentração representados pelas frações granulométricas mais finas contidas na mistura inicial (Figura 3.12). Esse comportamento foi coerente, uma vez que o fluxo laminar basal apresentou maior densidade.



**Figura 3.12:** Velocidades médias das correntes, medidas a 405 cm da desembocadura no decorrer do experimento (Equipamento UVP). Destaque à posição das sondas em relação ao fundo do tanque (cm). A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração (Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

As sondas 2 registraram as maiores velocidades em todos os experimentos, seguidas das sondas 1, 3, 4 e 5 respectivamente (Figura 3.13). Com exceção do experimento QCA, onde as velocidades medidas pelas sondas 3 e 4 foram muito semelhantes. A velocidade medida pela sonda 1 foi influenciada pelo atrito basal do fluxo com o fundo do tanque, o que ocasionou a diminuição de velocidade. Ressalta-se que os dados obtidos pela sonda 5 corresponderam a uma combinação entre valores de velocidade da corrente e da reflexão do fluxo pela cuba dissipadora (nuvem turbulenta que se deslocou de jusante para montante).

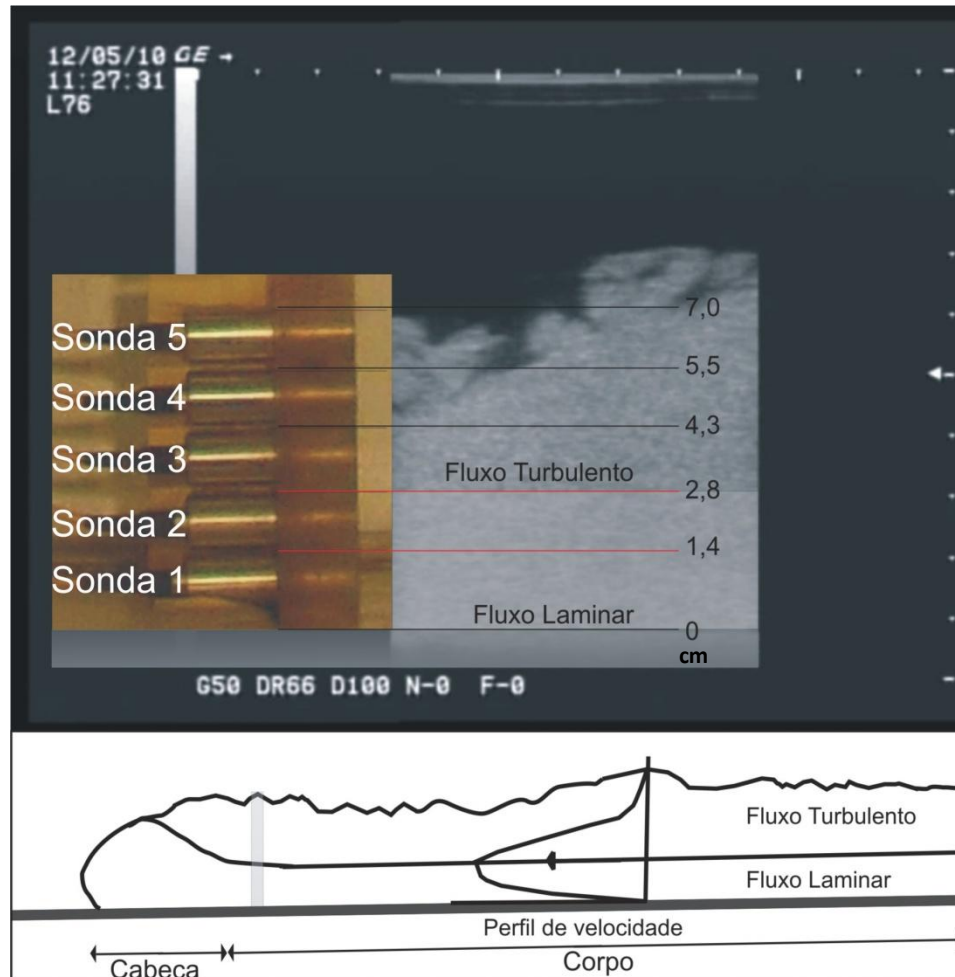


**Figura 3.13:** Perfil vertical da velocidade média das correntes no decorrer do experimento (Equipamento UVP). QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração (Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

A diferença entre a velocidade média da cabeça e do corpo da corrente não foi muito grande. Caso contrário, a cabeça iria se separar do restante do fluxo. Esse comportamento foi decorrente do equilíbrio entre as forças de empuxo e as forças gravitacionais, devido à alta porcentagem de caulim. Os maiores valores de velocidade ocorreram logo após a chegada da cabeça da corrente,

diminuindo durante a passagem do corpo e da cauda. Isso foi evidente nas correntes com vazão constante, mas também ocorreu nos experimentos com vazão variada. A taxa de sedimentação da porção basal foi maior do que a da porção superior. Conseqüentemente o fluxo desacelerou mais rapidamente na porção basal em comparação à porção superior, a qual apresentou valores de velocidade mais homogêneos.

O formato do perfil vertical de velocidade ao longo do tempo de evolução da corrente apresentou valores nulos nas interfaces. Em direção ao meio da camada os valores aumentaram até atingir a velocidade máxima (Figura 3.14). Nessa região, a altura da corrente foi controlada pelas forças de arraste nas interfaces superior e inferior (Kneller *et al.*, 1999; Kneller & Buckee, 2000; McCaffrey *et al.*, 2003; Mohrig & Marr, 2003).

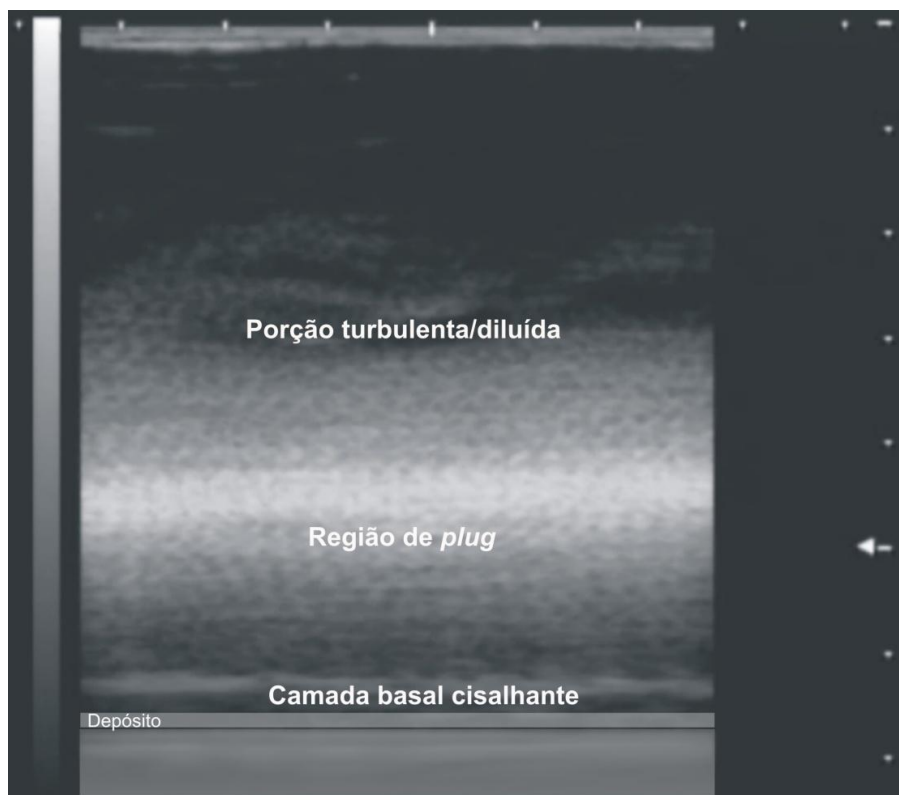


**Figura 3.14:** Perfil de velocidade vertical das correntes de densidade. No esquema inferior, destaca-se a posição correspondente à imagem superior. A sonda 2 registrou os maiores valores de velocidade (Foto representativa: Experimento QCA: vazão constante e alta concentração (20%); distâncias em cm).

As correntes de densidade simuladas apresentaram um perfil de velocidade tipo *plug*, o qual é caracterizado por uma camada basal cisalhante, pela região de *plug* e pela porção superior turbulenta (Figura 3.15). A formação da camada basal cisalhante foi decorrente da tensão cisalhante e da alta viscosidade rente ao fundo do tanque. A sua delimitação nas imagens de ultrassom foi complicada, uma vez que a corrente se confundia com o depósito em formação. Acima dessa camada cisalhante desenvolveu-se uma subcamada viscosa (fluxo laminar ou região de *plug*), a qual apresentou os maiores valores de velocidade uma vez que era mais densa.

A região de *plug* foi gerada devido ao valor de tensão de cisalhamento menor do que a tensão crítica de escoamento (*yield strength*). Essa região foi caracterizada pelo escoamento de um fluido pseudoplástico, com movimento em massa, onde os sedimentos não se tocavam devido ao excesso de densidade e a quantidade de material argiloso entre os grãos.

O fluxo na porção superior foi turbulento/diluído. Porém, em alguns momentos a turbulência foi menos desenvolvida ou o fluxo era laminar diluído, principalmente nos experimentos com correntes de alta concentração. Esse comportamento foi decorrente do excesso de densidade das correntes de alta concentração e do atrito entre o fluxo e a água ambiente. O desenvolvimento da turbulência foi inibido, a qual passou a ser um fenômeno induzido ou secundário. No caso das correntes com baixa concentração, o fluxo turbulento superior foi um processo mais dominante.



**Figura 3.15:** Perfil vertical das correntes simuladas (Foto representativa: Experimento QCA - vazão constante e alta concentração).

Alguns trabalhos publicados envolvendo simulações físicas de correntes de turbidez de alta concentração e de fluxos de detritos (*debris flow*) descreveram comportamento semelhante ao observado nas correntes de densidade simuladas nesta pesquisa (Kneller & Buckee, 2000; Mohrig & Marr 2003; Manica, 2009). A determinação da camada cisalhante basal não foi bem estabelecida e, algumas vezes, foi identificada como o próprio depósito e não como o fluxo. Isso não foi considerado um problema experimental, uma vez que é assim mesmo que ocorre na natureza. O depósito formado apresentou um movimento inercial devido ao elevado teor de argila. Apesar de continuar em movimento, não foi considerado como um fluxo. Middleton (1966b) denominou essa zona cisalhante basal como *quick bed*, a qual representava o próprio depósito.

Portanto, a análise da velocidade no decorrer do espaço foi baseada na análise dos dados obtidos com a sonda vectrino e com o equipamento UVP, além da observação das imagens de ultra-som e das filmagens dos experimentos. A velocidade dos fluxos variou ao longo do espaço, caracterizando fluxos não uniformes (*non-uniform flow*). Em certos momentos a velocidade

aumentou conforme a distância (*accumulative flow*), decorrente do aumento da vazão instantânea. Porém, nos minutos finais de todos os experimentos, a intensidade da vazão foi reduzida até que o fluxo parasse de escoar. Em geral, a velocidade do fluxo variou ao longo do espaço, diminuindo em função da distância percorrida. As correntes simuladas foram classificadas como depletivas (*depletive flow*).

Esse comportamento foi frequentemente observado nos trabalhos com simulações físicas de correntes de turbidez. Apesar dos fluxos terem sido depletivos, ocorreram eventos momentâneos de aceleração das correntes decorrentes de oscilações das vazões, as quais não permaneceram absolutamente constantes ao longo do tempo.

### **3.2. DEPÓSITO**

Os depósitos gerados nos experimentos foram analisados em escala macroscópica e microscópica. Buscou-se caracterizar as variações verticais (temporais) e horizontais (espaciais) dos mesmos, com ênfase em seus aspectos texturais e na organização interna das estruturas sedimentares.

A espessura de cada camada e a espessura total dos depósitos foram medidas em intervalos regulares (de 10 em 10 cm), ao longo de todo o comprimento do tanque. Essas medições foram feitas logo após e, aproximadamente, 20 horas após o final de cada experimento, quando o fluido do tanque já havia escoado completamente. Esse procedimento teve como objetivo constatar se ocorreram modificações nos depósitos no decorrer do tempo. Entre essas modificações, destaca-se a redução de espessura devido à expulsão de água. Constatou-se que em todos os experimentos ocorreram diminuições de espessura, as quais foram inferiores a 1 mm. Portanto, o percentual de diminuição das diminuições de espessura dos depósitos foi, em média, 0,5%. Os perfis representativos da distribuição e tendência de acumulação dos depósitos foram elaborados com base nas medidas obtidas quando o fluido ambiente estava ausente no tanque de experimentação, uma vez que era possível medir a espessura com uma maior precisão.

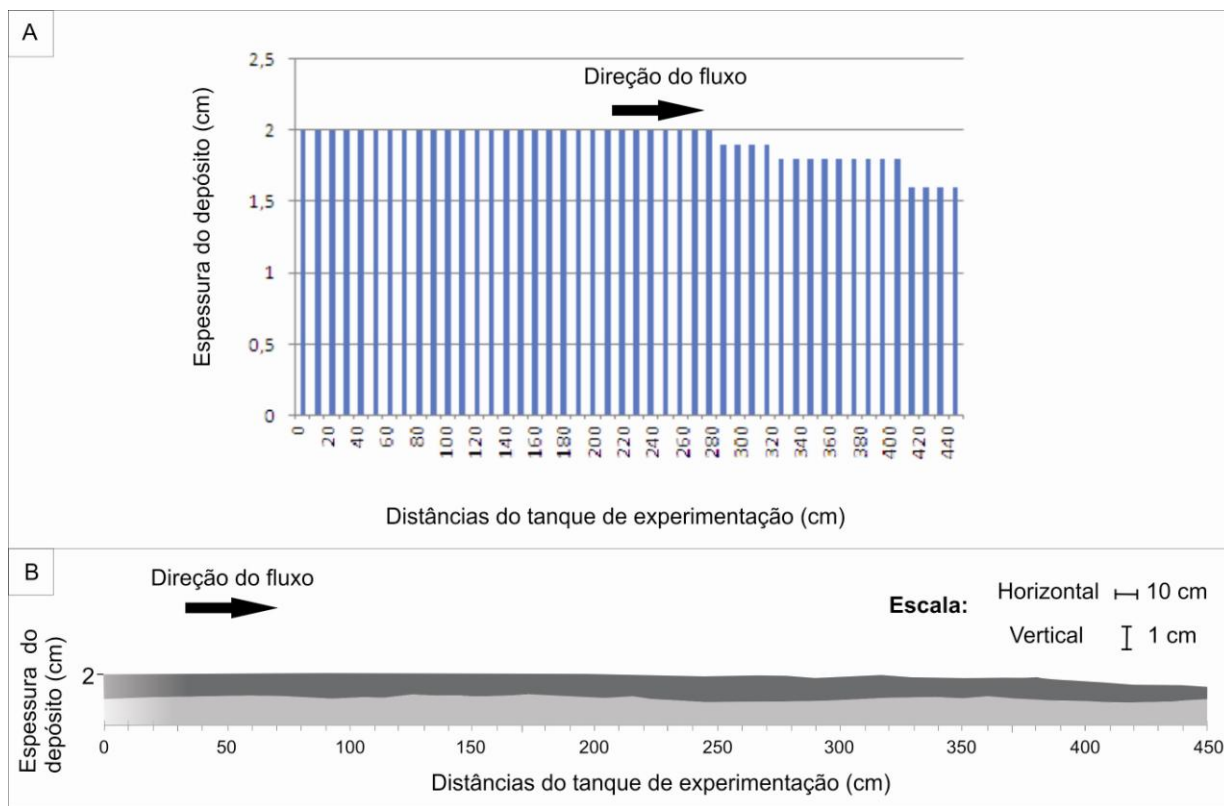
A análise microscópica foi realizada em 6 posições distintas do depósito, definidas com base nos experimentos preliminares. Foram coletadas amostras a 50, 100, 170, 240, 350 e 400 cm da desembocadura. Buscou-se determinar a distribuição granulométrica, a textura, os tipos de contato, esfericidade, arredondamento e a seleção dos sedimentos. Porém, em todos os

experimentos o tempo de duração e as características de transporte da corrente não foram suficientes para alterar o grau de arredondamento e esfericidade dos grãos determinados antes do início das simulações físicas. Os grãos de carvão variaram de sub-arredondados a sub-angulares, os grãos de ballotini eram predominantemente arredondados e os grãos de caulim sub-arredondados. A esfericidade dos grãos foi predominantemente baixa.

A análise das imagens geradas pelo equipamento de ultra-som e pelas filmagens permitiu estabelecer a influência das variações de vazão e concentração das correntes nos depósitos. Esses dados auxiliaram na interpretação dos mecanismos deposicionais e permitiram gerar um modelo deposicional.

### **3.2.1. DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QCA**

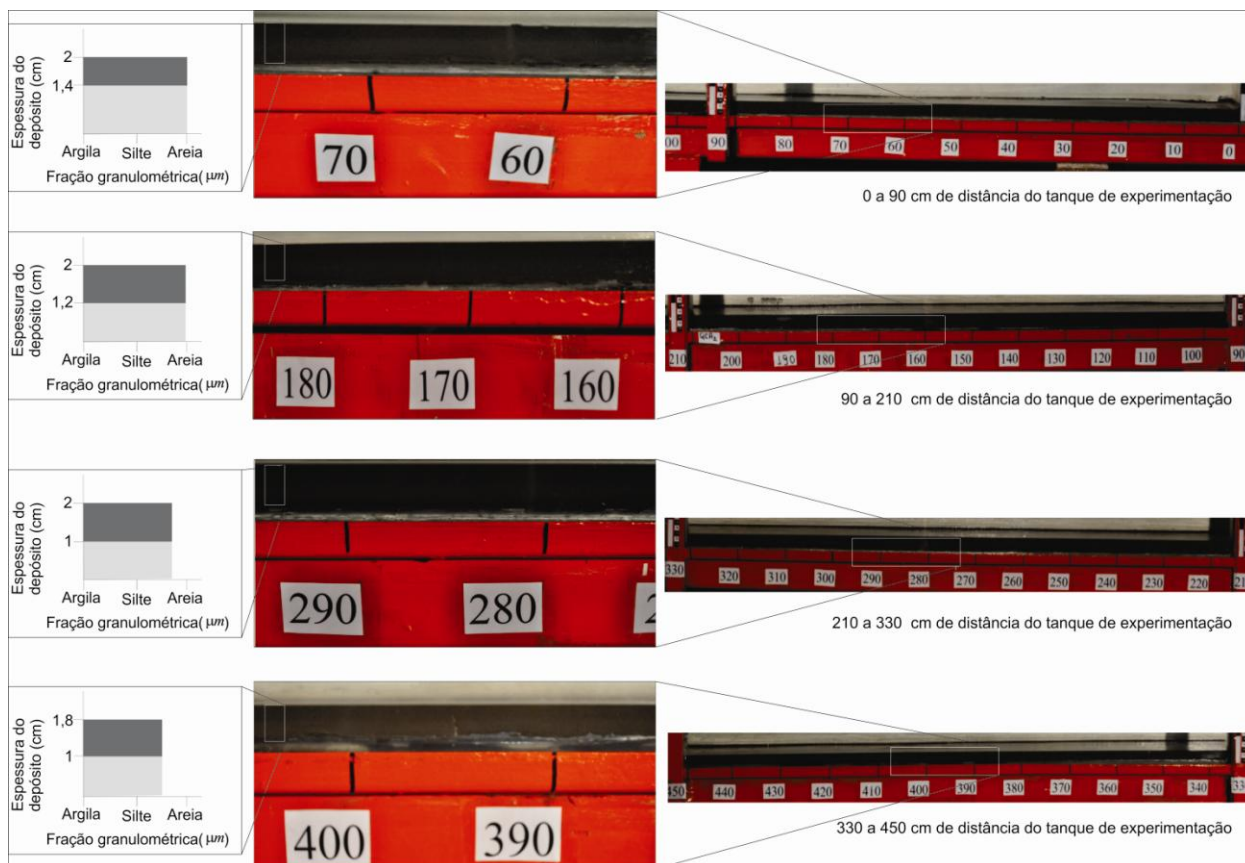
A espessura total do depósito gerado pela corrente de vazão constante e alta concentração diminuiu da porção proximal em direção a porção distal. Nos 280 cm iniciais do tanque de experimentação o depósito não variou de espessura, a qual apresentou valores de 2 cm. Posteriormente, a espessura do depósito diminuiu gradativamente, até atingir o valor de 1,6 cm (Figura 3.16).



**Figura 3.16:** Representação do depósito gerado pela corrente com vazão constante e alta concentração (Experimento QCA, concentração = 20%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação. Camada basal mais clara composta por maior concentração de sedimentos siliciclásticos em comparação com a camada superior mais escura.

O depósito apresentou características macroscópicas semelhantes em toda a sua distribuição longitudinal, apesar de apresentar variação de espessura. O depósito gerado foi caracterizado por duas camadas bem definidas. A camada basal era mais espessa e mais clara em relação à camada superior. A diferença de coloração foi decorrente da maior concentração de sedimentos siliciclásticos (ballotini) que, por serem mais densos que o carvão, se concentraram preferencialmente na porção basal da corrente. Os grãos de carvão estavam distribuídos aleatoriamente em ambas as camadas, as quais possuíam textura maciça. A espessura de cada camada variou da porção proximal à distal, como representado no perfil de acumulação do depósito (Figura 3.17).

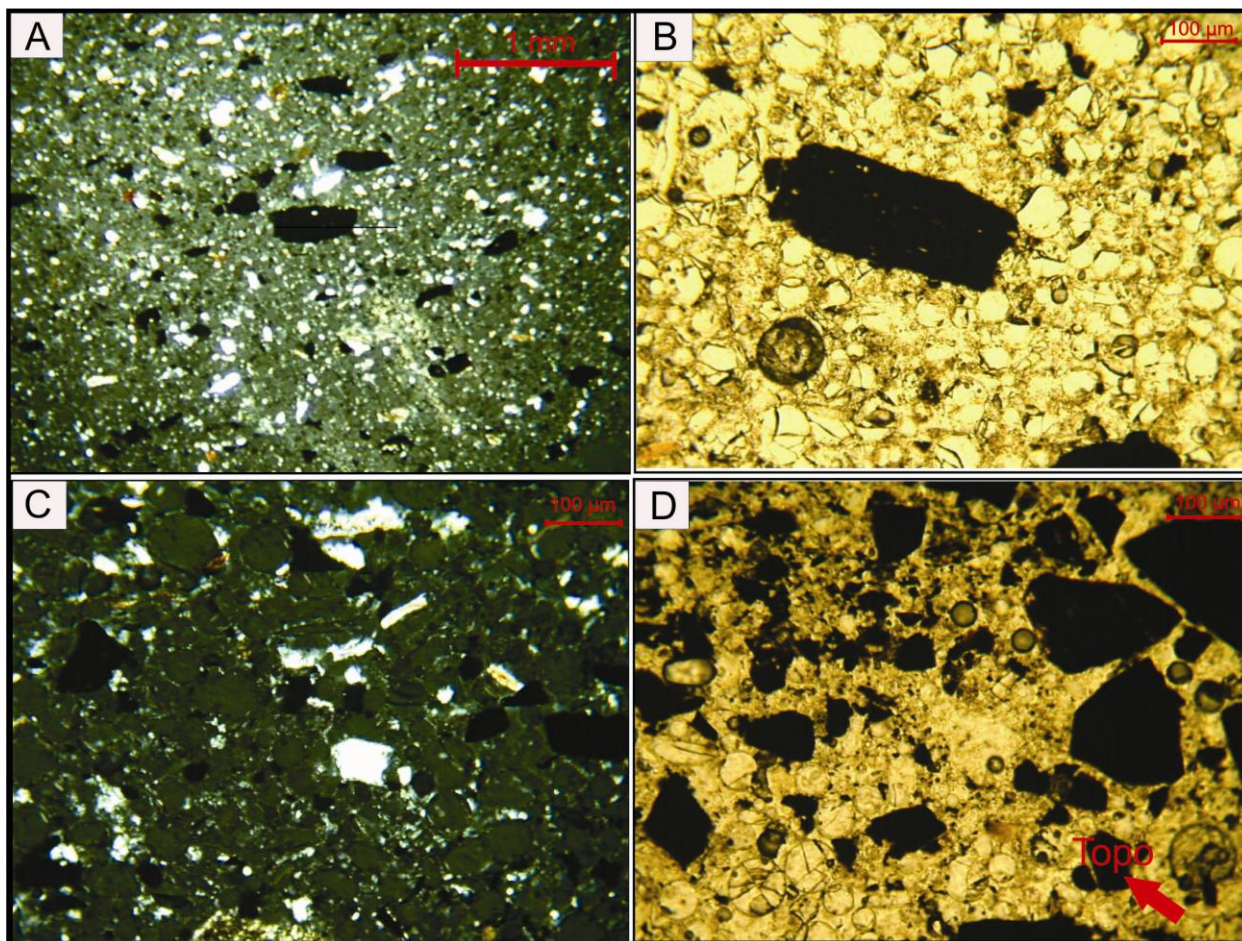




**Figura 3.17:** Depósito gerado no experimento com corrente de vazão constante e alta concentração (Experimento QCA, concentração = 20%). Depósito caracterizado por uma camada basal composta por maior concentração de sedimentos siliciclásticos (camada mais clara no desenho a esquerda) em comparação com a camada superior (camada mais escura no desenho a esquerda).

Os aspectos texturais microscópicos do depósito não variaram ao longo do tanque de experimentação. Porém, a distribuição granulométrica dos sedimentos foi diferenciada. O tamanho dos grãos diminuiu da região proximal em direção à região distal. Em geral, o depósito foi caracterizado por sedimentos mal selecionados, com contato flutuante predominante e textura homogênea. No topo do depósito ocorreu o desenvolvimento de gradação normal.

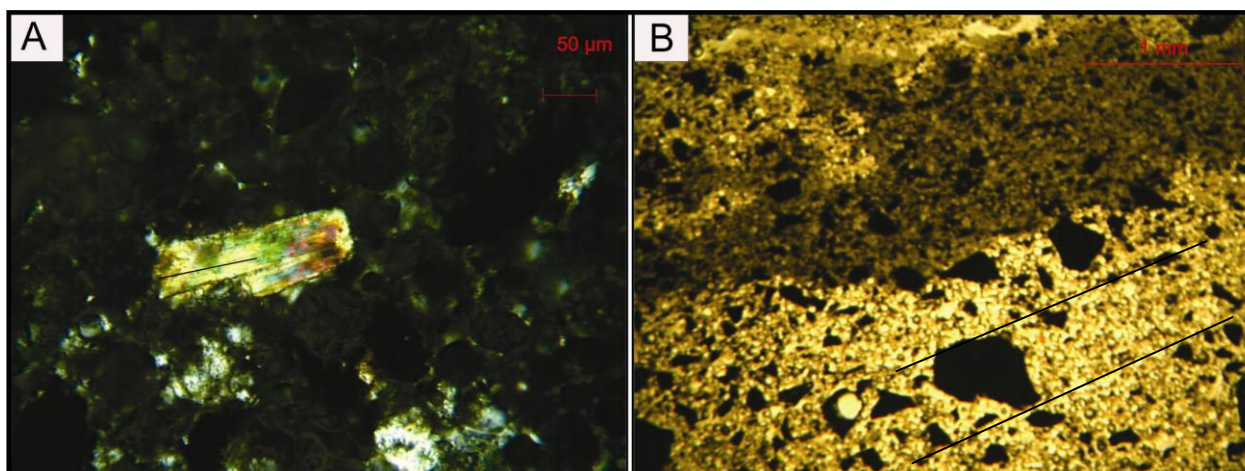
A análise da amostra coletada a 50 cm da desembocadura evidenciou que os grãos estavam distribuídos aleatoriamente e possuíam, predominantemente, fração granulométrica silte grosso (Figura 3.18A). A porção basal do depósito foi caracterizada por possuir matriz composta por caulim e ballotini muito fino. A presença de grãos dispersos de carvão com fração granulométrica areia era comum (Figura 3.18B), bem como de grãos de ballotini (Figura 3.18C). Em direção ao topo o tamanho dos grãos diminuiu, a presença de ballotini se tornou menos freqüente e a quantidade de caulim e carvão aumentou (Figura 3.18D).



**Figura 3.18:** Depósito localizado a 50 cm da desembocadura A) Sedimentos de fração granulométrica silte grosso, mal selecionados e textura caótica (nicóis cruzados); B) Grãos de carvão dispersos com tamanho relativamente maior que os demais grãos do arcabouço, os quais estavam envoltos por matriz argilosa (nicóis descruzados); C) Grãos de ballotini envoltos pela matriz argilosa (nicóis cruzados); D) Aumento da presença de carvão e redução das frações granulométricas em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados).

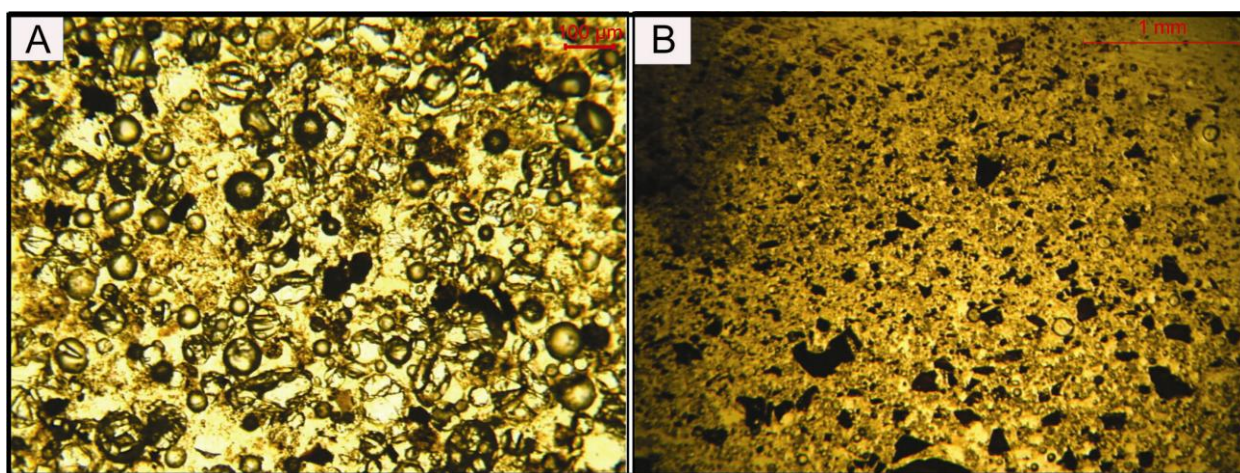
A análise microscópica do depósito localizado a 100 cm da desembocadura evidenciou características semelhantes em comparação com a amostra anterior. Foi possível distinguir duas porções com características distintas. A porção basal foi caracterizada pela presença de grãos de ballotini de fração granulométrica silte grosso envoltos pela matriz argilosa. A presença de grãos de carvão de fração granulométrica variando entre silte grosso e areia muito fina era comum. Os grãos de caulim de fração granulométrica areia fina encontravam-se dispersos (Figura 3.19A). Em direção ao topo do depósito a presença de carvão tornou-se mais intensa e a sua fração granulométrica diminuiu, bem como o tamanho dos grãos de caulim. Foi possível identificar estratificações plano-paralelas (Figura 3.19B).





**Figura 3.19:** Depósito localizado a 100 cm da desembocadura A) Grão de caulim disperso entre sedimentos de fração granulométrica relativamente menor (nicóis cruzados); B) Diminuição do tamanho dos grãos e maior concentração de carvão em direção ao topo do depósito. Presença de estratificações plano-arelas (nicóis descruzados).

Na posição 170 cm foi possível observar redução da fração granulométrica dos sedimentos, a qual foi caracterizada como silte médio. O depósito era composto por duas camadas bem definidas, assim como observado nos pontos de amostragem anteriores. A porção basal foi caracterizada por possuir grãos de carvão com tamanhos variados e distribuição aleatória entre os demais grãos do arcabouço, os quais estavam envoltos por matriz argilosa. Os grãos de ballotini algumas vezes confundiam-se com bolhas geradas durante a confecção da lâmina delgada (Figura 3.20A). Em direção ao topo do depósito o tamanho dos grãos diminuiu (Figura 3.20B).

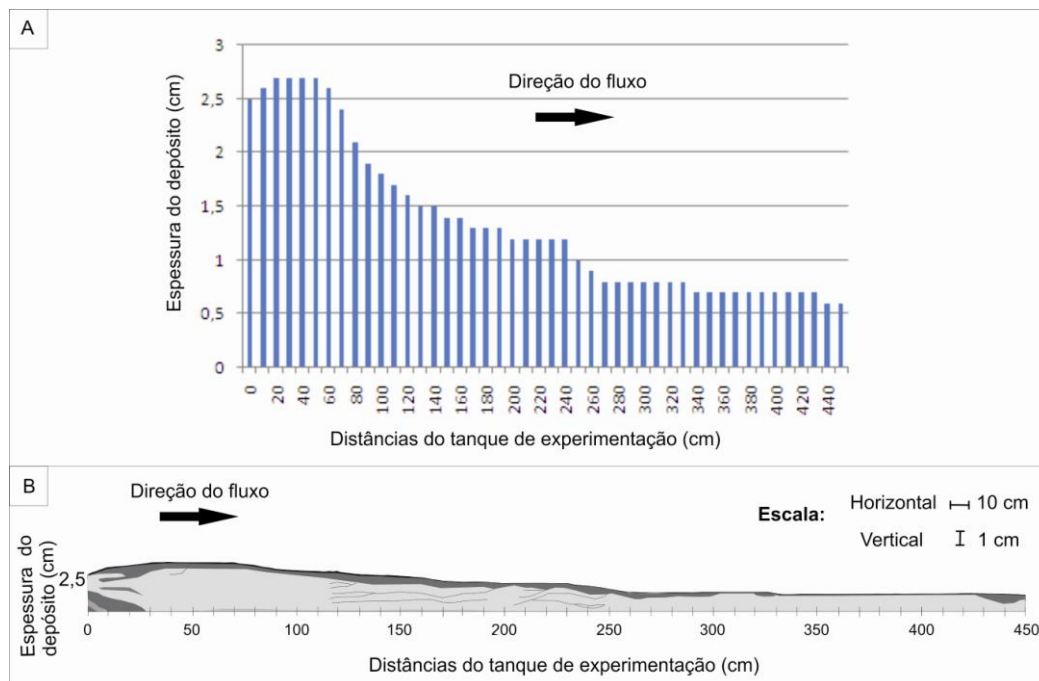


**Figura 3.20:** Descrição do depósito no ponto de amostragem 170 cm foi semelhante ao observado nos pontos posteriores A) Camada basal composta por sedimentos pobremente selecionados, textura caótica e contato flutuante predominante. Grãos do arcabouço envoltos por matriz argilosa (nicóis descruzados); B) Diminuição da fração granulométrica dos sedimentos em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados).

As características do depósito na posição 240 cm e 350 cm foram semelhantes às descritas no ponto anterior. Na posição 400 cm a presença do equipamento UVP interferiu no depósito gerado, uma vez que o ponto de amostragem estava posicionado depois do equipamento. Porém, a tendência de diminuição das frações granulométricas e o reconhecimento de duas camadas no depósito continuaram a ser observadas.

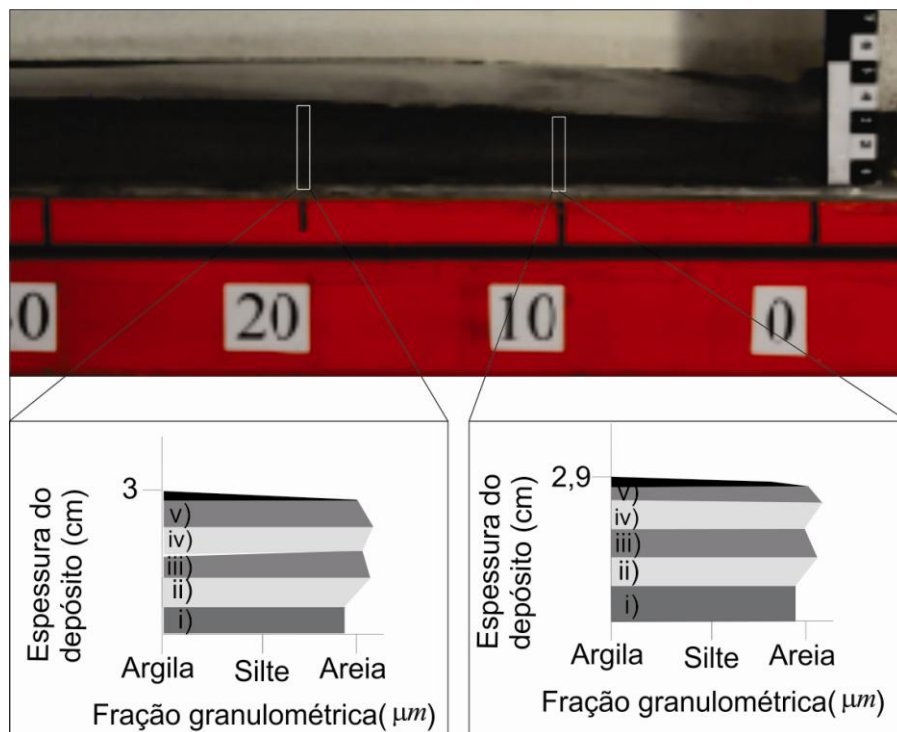
### 3.2.2. DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QCB

A distribuição longitudinal do depósito gerado pela corrente de densidade de baixa concentração evidenciou diminuição expressiva da espessura do depósito da porção proximal em direção à porção distal do tanque de experimentação. Nos 60 cm iniciais do tanque, o depósito apresentou pouca variação de espessura, a qual apresentou valores em torno de 2,7 cm. Nos 190 cm seguintes do tanque, a espessura do depósito diminuiu em média 1 cm a cada 20 cm de distância. No restante do tanque a espessura do depósito variou de 0,9 a 0,6 cm em direção à porção distal (Figura 3.21).



**Figura 3.21:** Representação do depósito gerado pela corrente com vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB, concentração = 10%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação. Região mais clara composta por maior concentração de sedimentos siliciclásticos em comparação com a região mais escura.

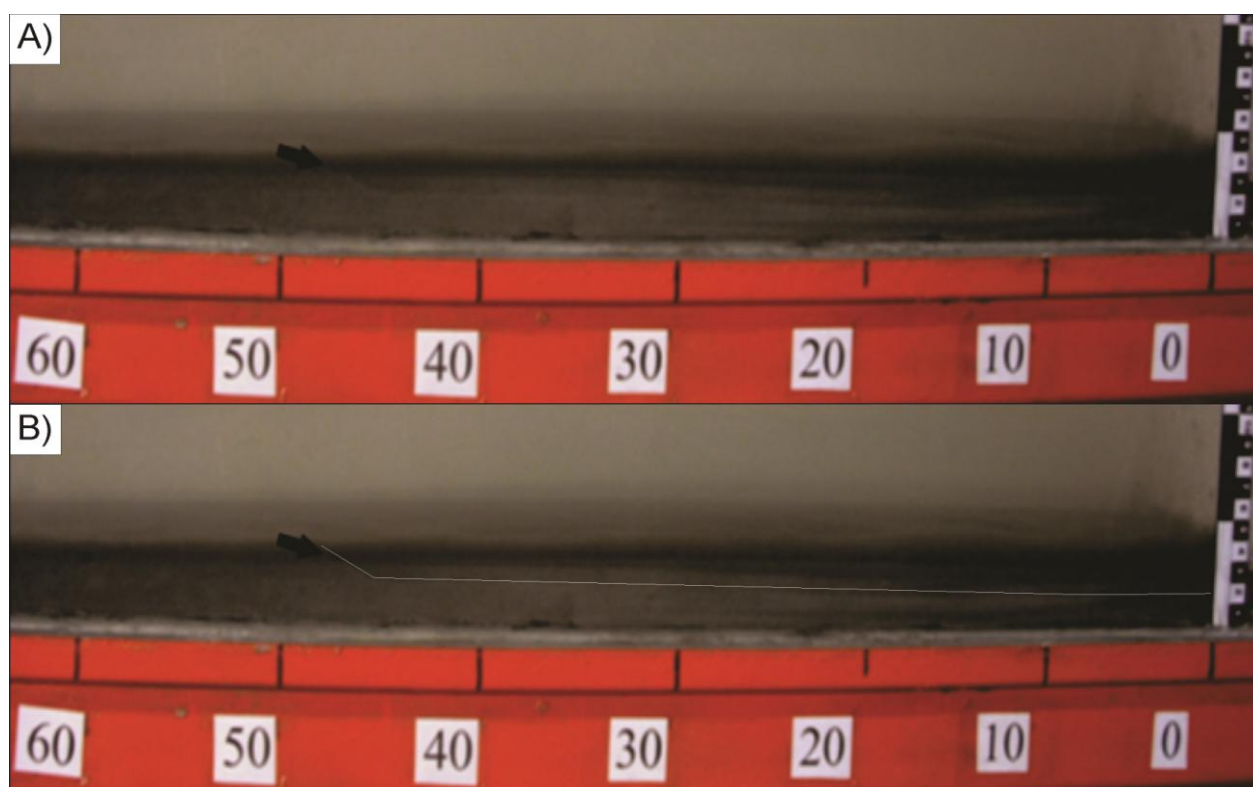
Nos 20 cm iniciais do tanque de experimentação foram diferenciadas distintas camadas, as quais foram definidas com base nas variações texturais. Apesar de todas as camadas serem compostas por carvão, ballotini e caulim, a concentração de cada material variou verticalmente. Conseqüentemente foi possível diferenciar as camadas. Os depósitos observados na posição 10 e 20 cm foram muito semelhantes, sendo caracterizados da base para o topo (Figura 3.22) por camadas compostas de: i) 36% carvão, 33% ballotini e 31% caulim, ii) 30% carvão, 38% ballotini e 32% caulim; iii) 35% carvão; 33% ballotini e 32% caulim; iv) 30% carvão, 38% ballotini e 32% caulim; v) 36%, 30% ballotini e 34% caulim; vi) película de carvão. Porém, essa variação de textura foi gerada devido à proximidade dessa região do depósito com o difusor de bucal simples por onde o fluxo era introduzido no tanque. Portanto, correspondeu a um “erro experimental”, não apresentando um significado geológico.



**Figura 3.22:** Depósito no início do tanque de experimentação gerado pela corrente de vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB, concentração = 10%). Destaque às colunas sedimentares representativas do depósito nas posições de 10 cm e 20 cm.



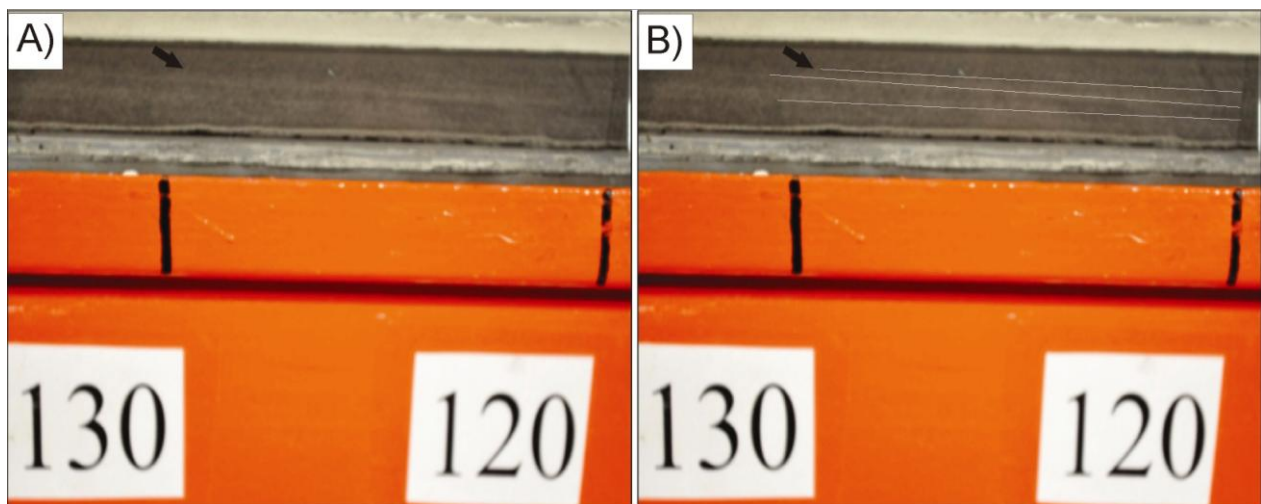
Em direção à porção distal, a intercalação de camadas tornou-se mais difusa. Entre a posição de 30 cm até, aproximadamente, à posição de 110 cm foram observadas duas camadas bem delimitadas. A camada basal foi caracterizada por ser mais espessa e mais clara em comparação com a camada superior. A camada basal na posição de 30 cm era composta por 25% carvão, 35% ballotini e 40% caulim. A camada superior era composta por 35% carvão, 30% ballotini e 35% caulim. O depósito gerado na posição de 40 cm não variou muito em relação à posição anterior. Entre a posição 40 e 50 cm formou-se uma marca de erosão (Figura 3.23).



**Figura 3.23:** Depósito gerado pela corrente de vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB, concentração = 10%). A variação textural observada no início do tanque de experimentação tornou-se menos evidente com o aumento da distância percorrida pela corrente. A) Presença de marca de erosão na posição 47 cm. B) Destaque à marca de erosão.

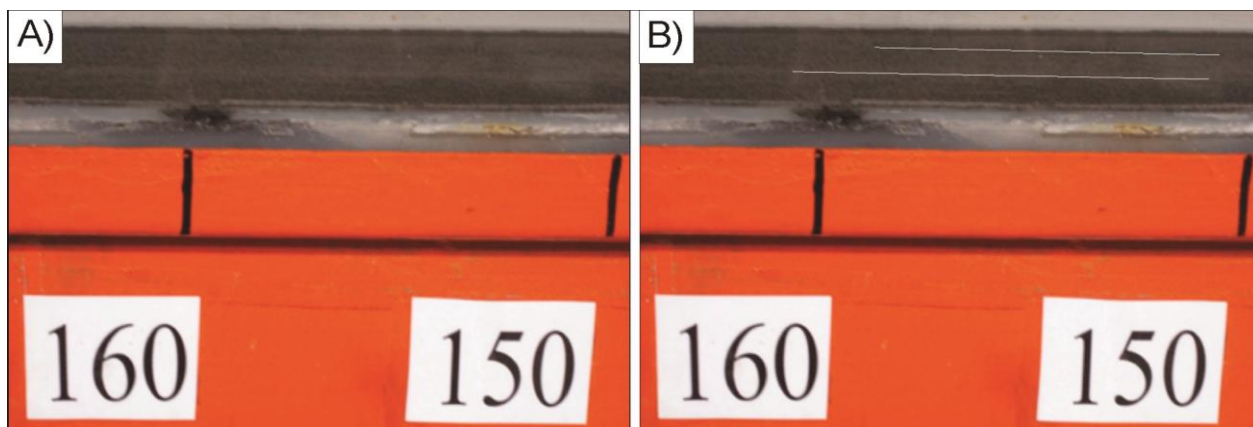
A marca de erosão foi gerada pela ação hidráulica. A corrente ao sair do difusor de bucal simples se expandiu. Conseqüentemente, os grãos mais densos tenderam a se deslocar na porção basal e os menos densos na porção superior da corrente. A marca de erosão foi gerada pelo deslocamento das partículas e da água presente entre os grãos, o que correspondeu a um processo pós-deposicional ou quase-deposicional.

Aproximadamente na posição 120 cm formaram-se laminações cruzadas de baixo ângulo ou laminações quase paralelas (*quasi-parallel laminations*), as quais estavam mais evidentes entre as posições 120 cm e 130 cm do tanque de experimentação. Essas laminações possuíam aproximadamente 2° de inclinação e foram caracterizadas pela sua coloração branca e intensa presença de caulim (Figura 3.24).



**Figura 3.24:** A) Laminação cruzada de baixo ângulo gerada no experimento com corrente de vazão constante e baixa concentração. B) Ênfase às laminações (Experimento QCB, concentração = 10%).

Em direção à posição 140 cm as laminações tornaram-se mais difusas. Até a posição 250 cm foi possível identificar variações texturais. O depósito foi caracterizado pela intercalação de lâminas paralelas milimétricas de composição argilosa e coloração esbranquiçada, com camadas onde a quantidade do caulim era relativamente menor (Figura 3.25).

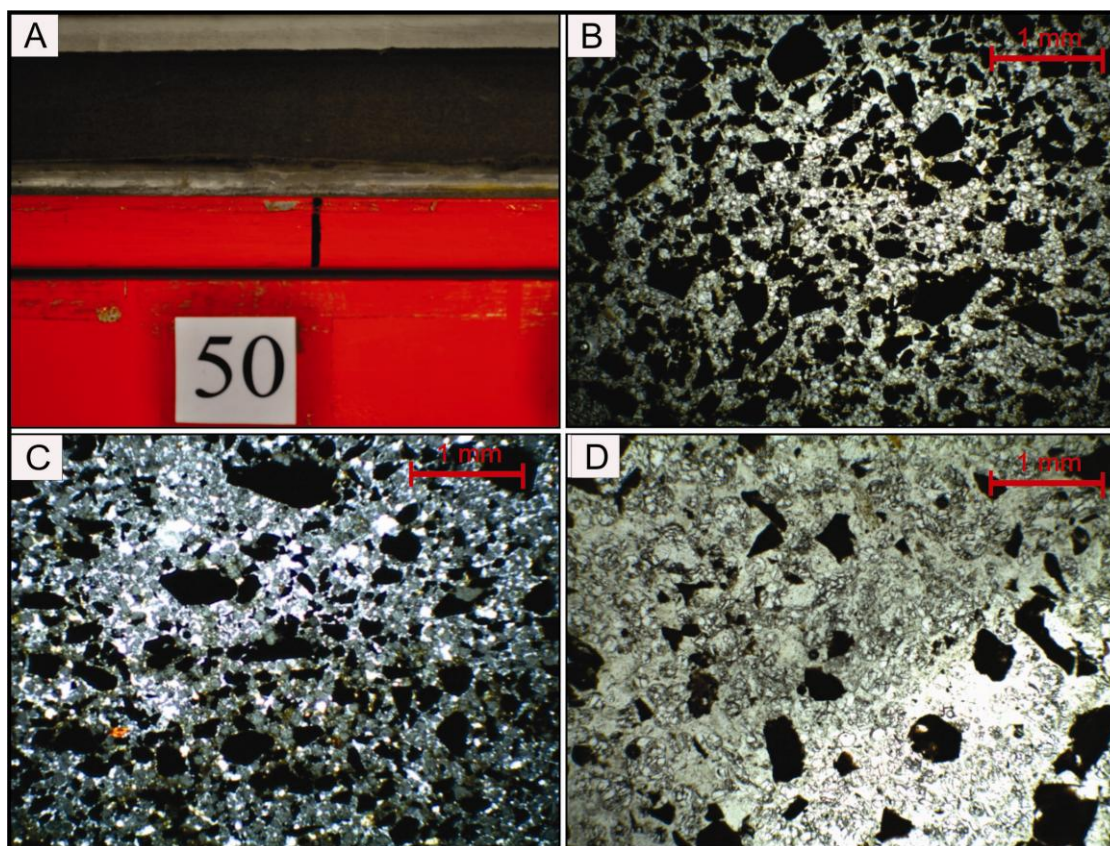


**Figura 3.25:** A) Intercalação de lâminas com quantidade relativa de caulim diferenciada, gerada pela corrente de vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB, concentração = 10%). B) Destaque às lâminas geradas no depósito.

O depósito presente na porção distal do tanque de experimentação era maciço, predominando grãos de caulim e carvão sem uma distribuição preferencial. Toda a extensão do depósito foi recoberto por uma fina película de carvão. Essa película formou-se após o final do fluxo da corrente de densidade, sendo resultado da decantação dos sedimentos mais finos transportados em suspensão na nuvem turbulenta superior.

A análise microscópica do depósito a 50 cm da desembocadura (Figura 3.26A) permitiu diferenciar 4 lâminas distintas. A lâmina inferior era composta por 35% ballotini com fração granulométrica predominante silte grosso, 35% caulim e 30% carvão com tamanho areia. A presença de grãos dispersos de carvão era intensa e a matriz era argilosa (Figura 3.26B). Na segunda lâmina a presença de carvão tornou-se mais escassa. Os sedimentos apresentaram a seguinte concentração e fração granulométrica: 20% carvão com tamanho areia muito fina, 40% ballotini com tamanho silte médio e 40% caulim compondo a matriz argilosa (Figura 3.26C). A terceira lâmina foi diferenciada devido ao aumento da frequência dos grãos de carvão na matriz e diminuição dos grãos de carvão compondo os grãos do arcabouço (35%) e diminuição da concentração do ballotini (35%) (Figura 3.26D). Na quarta lâmina a proporção entre os grãos não foi alterada, porém a fração granulométrica dos sedimentos diminuiu.



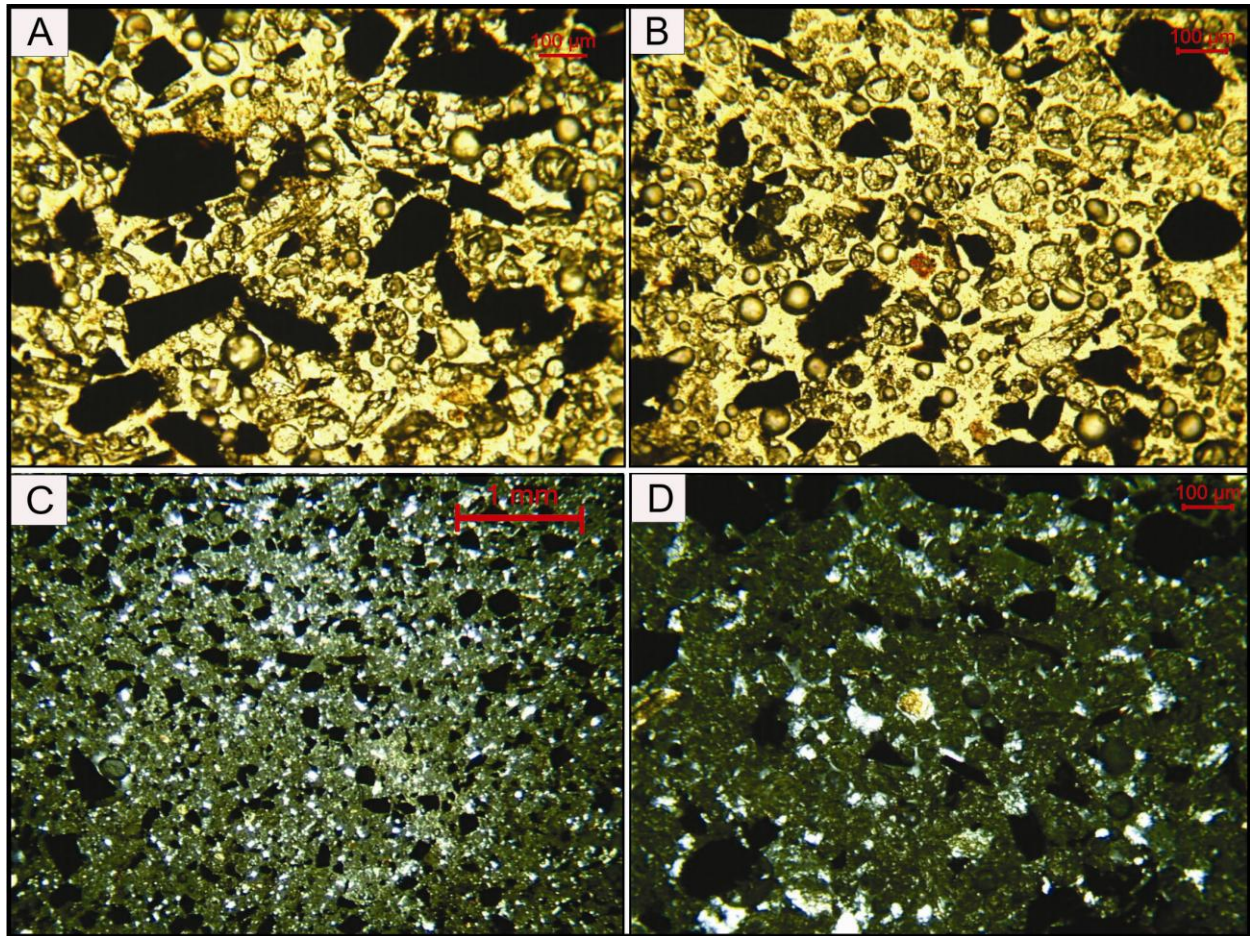


**Figura 3.26:** Depósito localizado a 50 cm da desembocadura A) Depósito foi caracterizado por duas camadas, uma basal mais espessa e mais clara em relação à camada superior. A camada basal apresentou sutis laminações; B) Lâmina basal composta por grãos de carvão dispersos, ballotini e matriz argilosa (nicóis cruzados); C) A presença de carvão torna-se mais escassa (nicóis cruzados); D) Aumento da concentração de carvão de fração granulométrica fina e diminuição dos grãos de carvão de fração granulométrica grossa na terceira lâmina e na quarta lâmina, com diminuição de granulometria em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados).

A análise microscópica da amostra coletada a 100 cm da desembocadura diferenciou duas camadas no depósito. Na camada basal foi possível identificar quatro lâminas. A lâmina inferior era composta por 30% carvão, 35% Ballotini e 35% caulim. Essa lâmina foi caracterizada por possuir grãos dispersos de carvão com tamanho areia, além de grãos de ballotini e caulim com fração granulométrica silte médio. Os sedimentos estavam envoltos por uma matriz argilosa (Figura 3.27A). A distinção com a segunda lâmina foi sutil, a qual foi diferenciada por possuir uma matriz mais clara e por maior concentração de caulim (43%). Além disso, a presença de grãos de carvão dispersos na lâmina inferior era mais intensa e os grãos estavam mais próximos uns dos outros em relação à segunda lâmina (Figura 3.27B). A terceira lâmina apresentou características semelhantes à lâmina inferior, sendo composta por: 25% carvão, 35% ballotini e

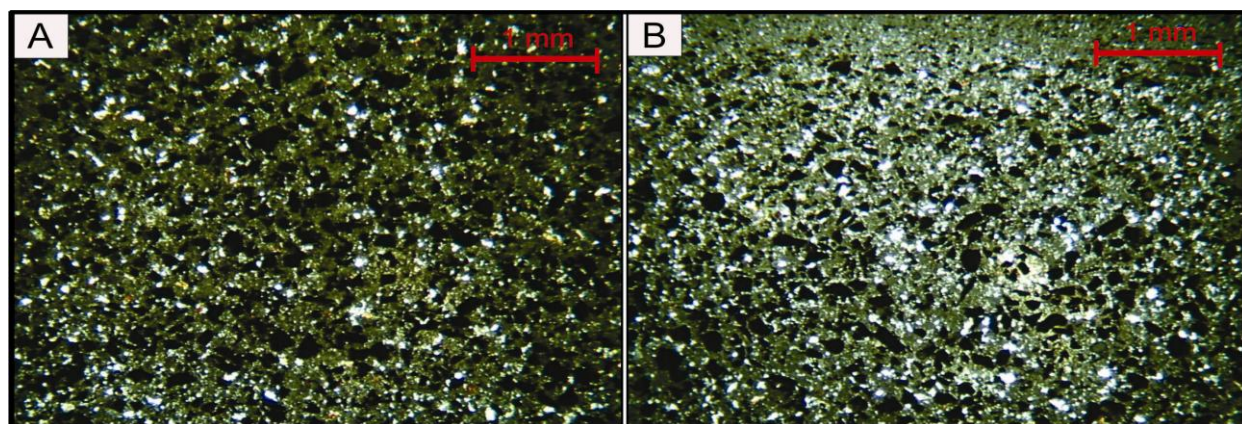


40% caulim. A matriz argilosa era relativamente mais escura em comparação com a segunda lâmina (Figura 3.27C). A lâmina superior apresentou características semelhantes à segunda lâmina. Em direção ao topo aumentou a concentração de carvão e sua fração granulométrica (Figura 3.27D).



**Figura 3.27:** Depósito localizado a 100 cm da desembocadura A) Lâmina inferior composta por grãos dispersos de carvão, ballotini e matriz argilosa (nicóis descruzados); B) Segunda lâmina com sutil diferença em relação à lâmina inferior. A cor da matriz tornou-se mais clara devido à maior concentração de caulim e os grãos de carvão eram mais dispersos (nicóis descruzados); C) Em direção ao topo ocorreu aumento da concentração e fração granulométrica dos grãos de carvão, característico da terceira lâmina (nicóis cruzados); D) No topo da lâmina ocorreu um nível com grãos de carvão com fração granulométrica areia fina. Intensa presença da matriz argilosa (nicóis cruzados).

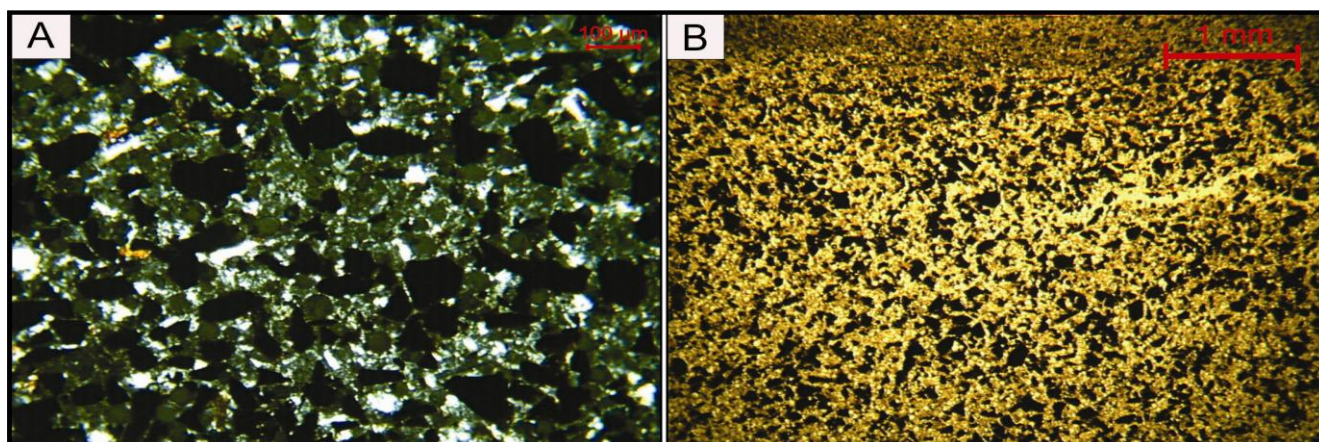
Na posição de 170 cm não foi possível observar laminações e a fração granulométrica era menor em relação aos pontos de amostragem anteriores. O depósito possuía grãos de carvão com tamanho silte grosso, grãos de ballotini de fração silte médio e grãos de caulim com tamanho silte muito fino. O depósito foi caracterizado por possuir textura caótica, sedimentos mal selecionados, empacotamento frouxo e contato flutuante predominante (Figura 3.28A). A fração granulométrica dos sedimentos diminuiu em direção ao topo do depósito (Figura 3.28B).



**Figura 3.28:** A) Aspecto geral do depósito a 170 cm da desembocadura (nicóis cruzados); B) Diminuição da fração granulométrica em direção ao topo do depósito (nicóis cruzados).

Na posição de 240 cm a descrição da lâmina foi muito semelhante à anterior. As frações granulométricas dos grãos de carvão era silte médio, dos grãos de ballotini silte fino e dos grãos de caulim silte muito fino. A matriz era argilosa. Na posição de 350 cm foi possível observar diminuição da fração granulométrica. O depósito era representado por 35% carvão de tamanho silte fino, 30% ballotini de fração granulométrica silte muito fino e 35% caulim compondo a matriz (Figura 3.29A). A camada superior apresentou espessura maior em comparação com o ponto de amostragem anterior (Figura 3.29B). Os grãos de ballotini eram ausentes, os grãos de carvão eram predominantes, possuíam tamanho silte muito fino e o caulim estava presente na matriz. A espessura do depósito gerado a 400 cm da desembocadura era muito fina, o que inviabilizou a confecção da lâmina delgada.

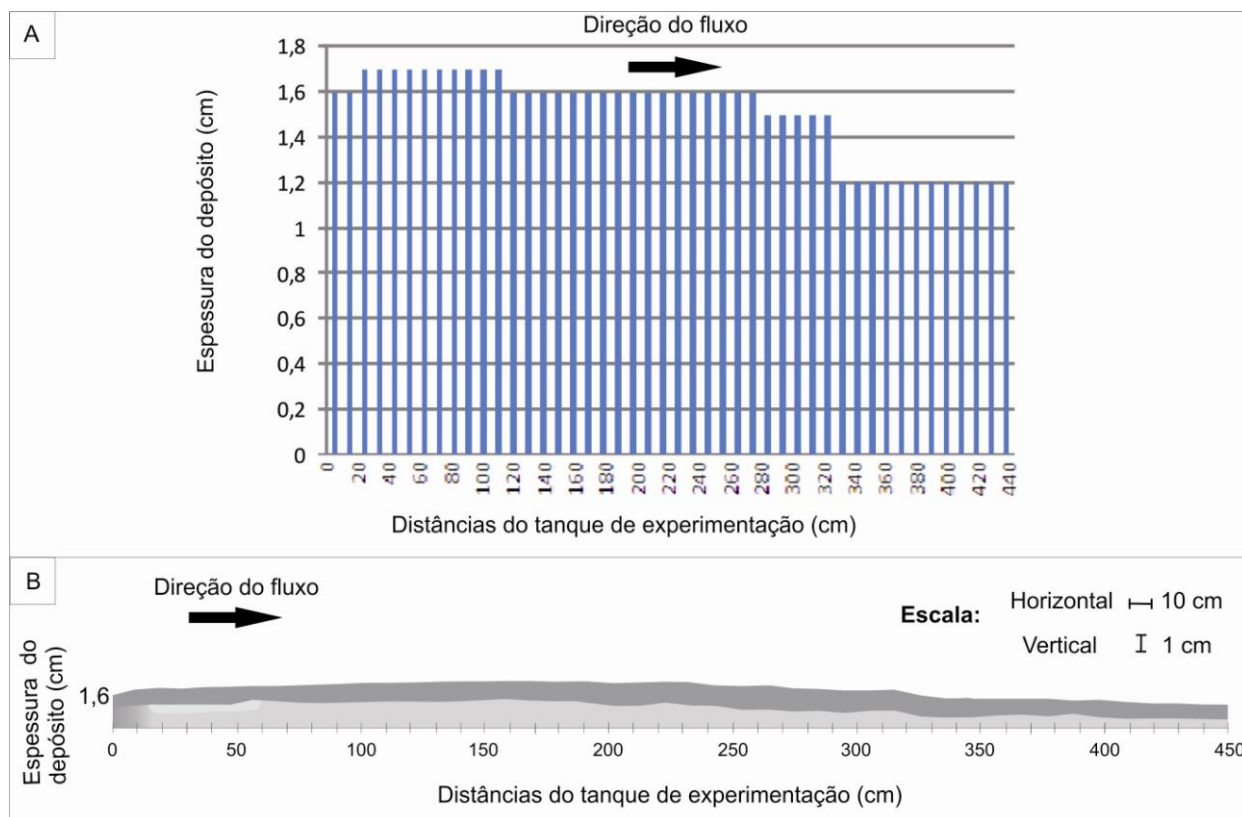




**Figura 3.29:** A) Aspecto geral do depósito gerado a 350 cm da desembocadura (nicóis cruzados); B) Diminuição da fração granulométrica em direção ao topo do depósito (nicóis descruzados).

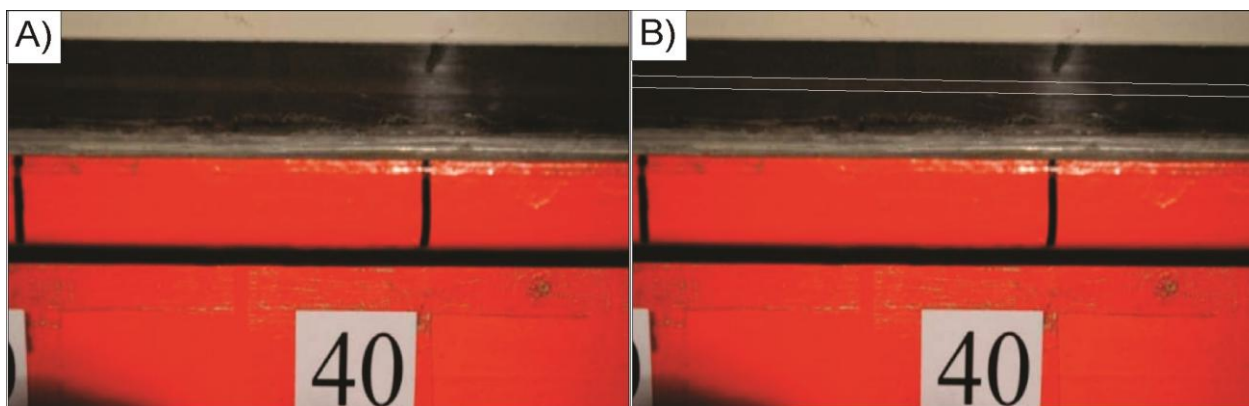
### 3.2.3. DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QVA

A distribuição longitudinal do depósito gerado pela corrente de densidade de alta concentração e vazão variada evidenciou diminuição da espessura do depósito da porção proximal em direção à porção distal do tanque de experimentação. Porém, nos 20 cm iniciais do tanque o depósito apresentou um ligeiro aumento de espessura, a qual passou de 1,6 cm para 1,7 cm. Após 120 cm de distância da desembocadura, a espessura do depósito se manteve em 1,6 cm. Entre 290 cm e 330 cm a espessura do depósito foi 1,5 cm. Nos centímetros finais do tanque de experimentação, a espessura do depósito foi 1,2 cm (Figura 3.30).



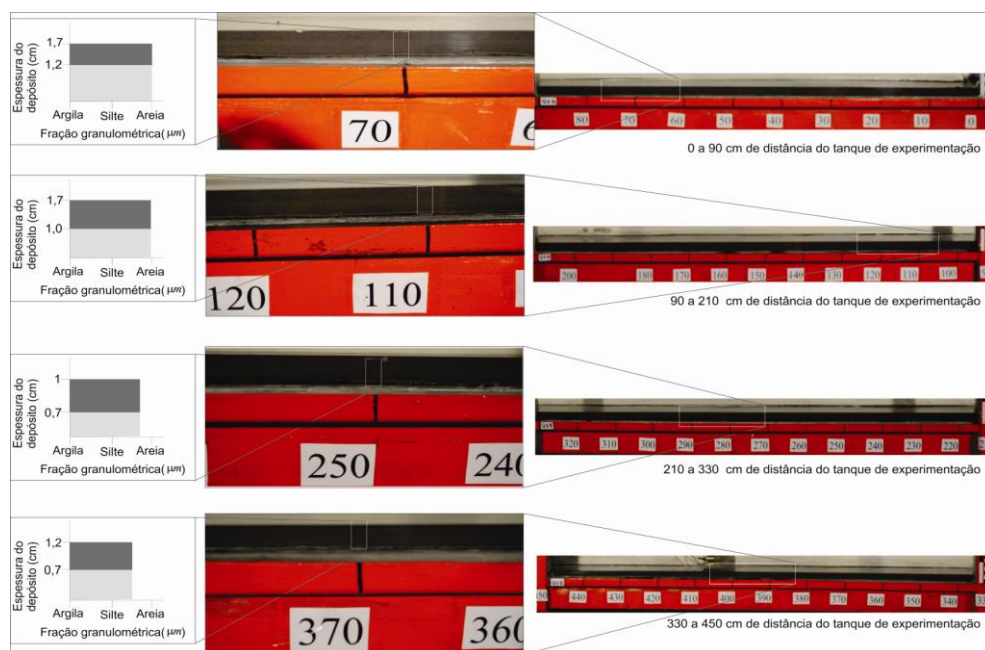
**Figura 3.30:** Representação do depósito gerado pela corrente com vazão variada e alta concentração (Experimento QVA; concentração = 20%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação. Camada basal mais clara composta por maior concentração de sedimentos siliciclásticos em comparação com a camada superior mais escura.

O depósito gerado apresentou três camadas distintas nos primeiros 60 cm do tanque de experimentação. A espessura de cada camada variou. A camada intermediária foi caracterizada por ser mais clara em comparação com a camada basal e com a camada superior. Os grãos de carvão estavam espalhados por todas as camadas, porém em menor quantidade na camada intermediária (Figura 3.31).



**Figura 3.31:** A) Depósito gerado pela corrente com vazão variada e alta concentração no início do tanque de experimentação, caracterizado por três camadas distinguidas devido a variações texturais (concentração = 20%). B) Destaque às camadas geradas.

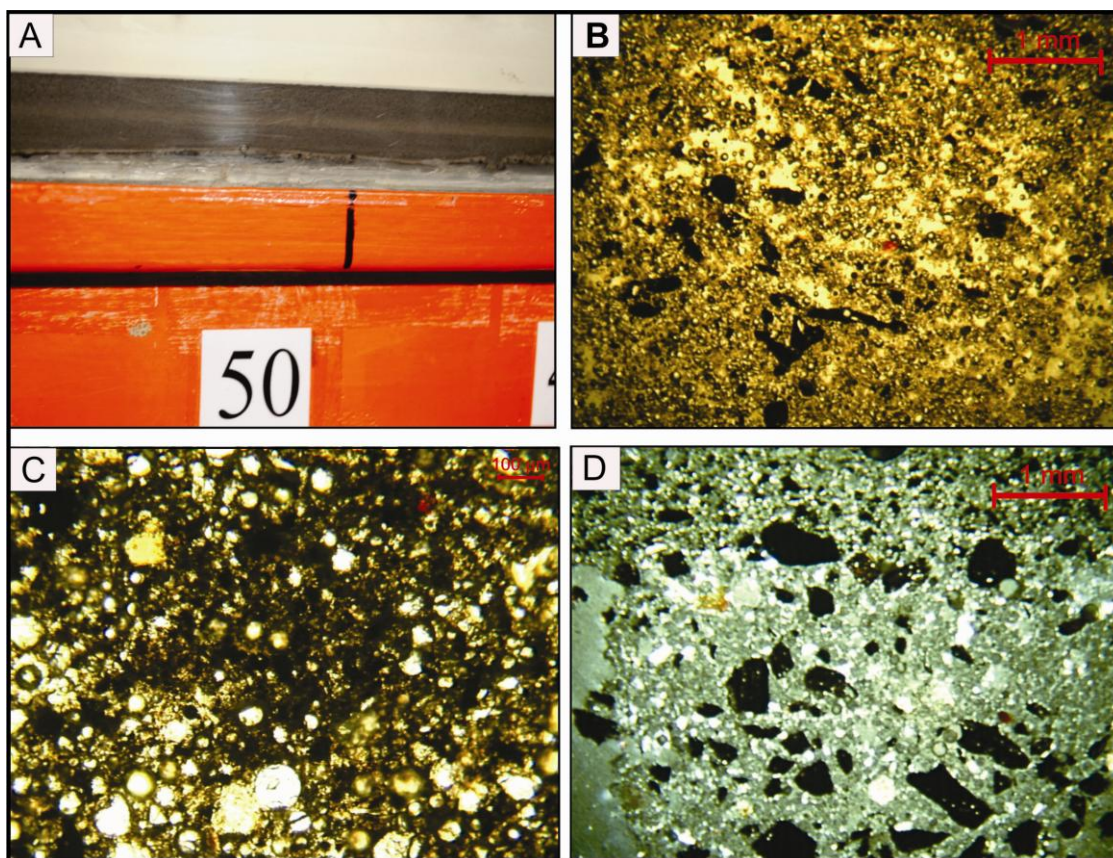
No restante do tanque de experimentação, o depósito apresentou características macroscópicas semelhantes em toda a sua distribuição longitudinal. O depósito era composto por duas camadas. A camada inferior era relativamente mais clara do que a camada superior. A espessura de cada camada variou horizontalmente, como representado no perfil de acumulação do depósito (Figura 3.32).



**Figura 3.32:** Depósito gerado no experimento com corrente de vazão variada e alta concentração (Experimento QVA; Concentração = 20%). Depósito caracterizado por uma camada basal composta por menor concentração de grãos de carvão em comparação com a camada superior.

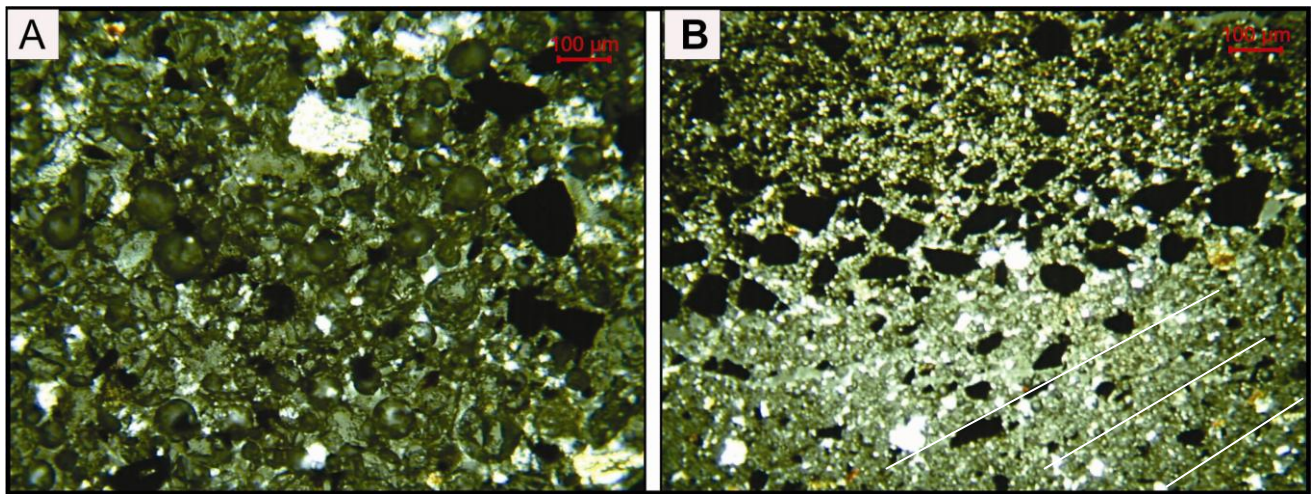


A análise microscópica do depósito a 50 cm da desembocadura evidenciou três camadas distintas (Figura 3.33A). A camada basal foi caracterizada por grãos com fração granulométrica silte médio, mal selecionados e textura caótica. Os grãos do arcabouço eram compostos predominantemente por 65% ballotini e 30% carvão. A presença de grãos de caulim foi escassa (5%). A quantidade de matriz argilosa foi intensa (Figura 3.33 B). A segunda camada foi caracterizada por possuir maior concentração de argila e grãos de carvão com fração granulométrica menor em comparação com a camada basal (Figura 3.33C). Em direção ao topo do depósito a concentração de carvão aumentou e a fração granulométrica dos grãos do arcabouço diminuiu (Figura 3.33D).



**Figura 3.33:** Depósito localizado a 50 cm da desembocadura A) Depósito caracterizado por três camadas distintas; B) Camada basal composta por grãos de carvão dispersos, ballotini e matriz argilosa (nicóis descruzados); C) Concentração de argila aumenta e a fração granulométrica dos grãos de carvão diminui (nicóis descruzados); D) Diminuição da fração granulométrica dos sedimentos em direção ao topo do depósito (nicóis cruzados).

O depósito localizado a 100 cm da desembocadura foi caracterizado por duas camadas distintas. A camada basal era composta predominantemente por grãos de ballotini envoltos pela matriz argilosa, com fração granulométrica silte médio. A presença de grãos dispersos de carvão de tamanho areia fina e caulim era comum (Figura 3.34A). Em direção ao topo do depósito ocorreu diminuição da fração granulométrica e aumento da concentração de carvão e caulim, bem como diminuição na quantidade de grãos de ballotini. Entre a camada basal e a camada superior ocorreu a presença de um nível composto predominantemente de carvão com fração granulométrica areia. Presença de estratificação plano-paralela (Figura 3.34B).



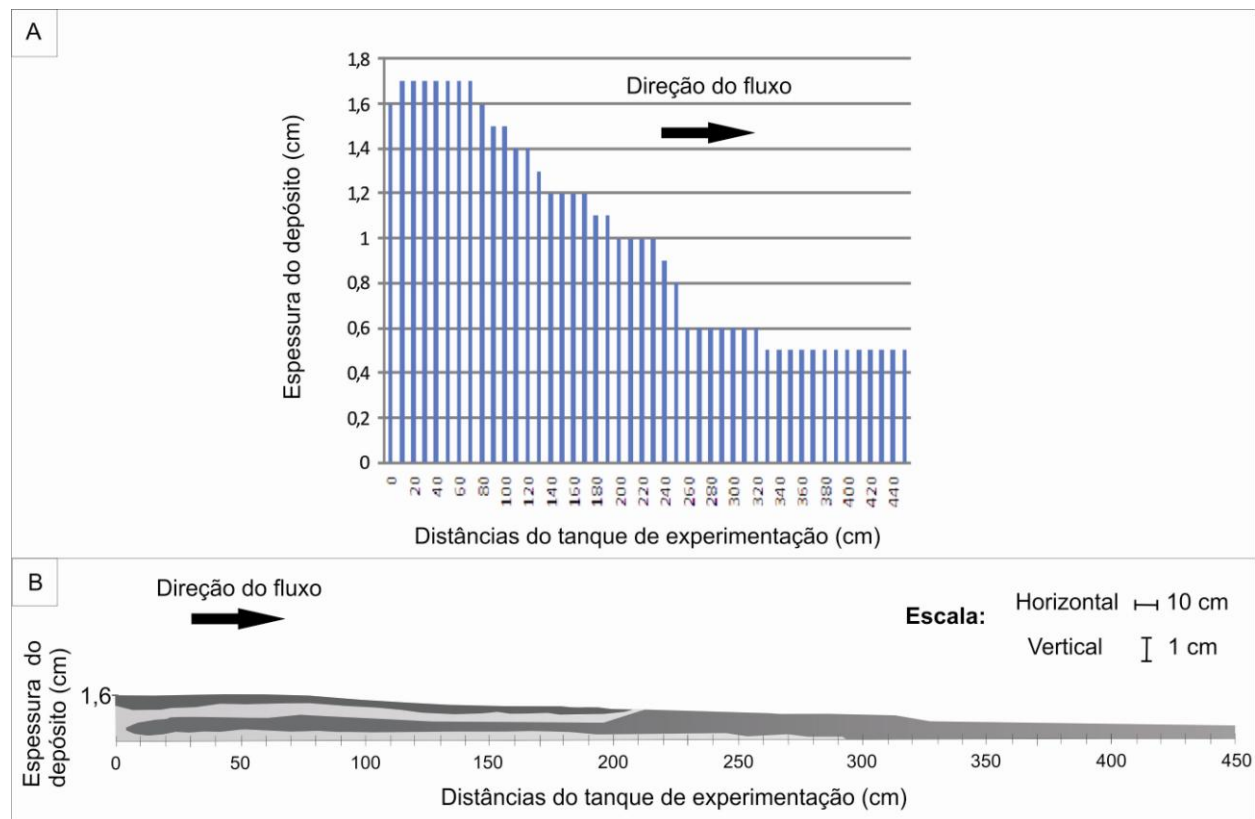
**Figura 3.34:** A) Camada basal composta por grãos de ballotini e carvão envoltos por matriz argilosa (nicóis cruzados); B) Em direção ao topo do depósito ocorreu diminuição da fração granulométrica e aumento da concentração de argila e carvão. Presença de estratificação plano-paralela (nicóis cruzados).

A descrição microscópica do depósito localizado a 170 cm da desembocadura apresentou características semelhantes ao ponto de amostragem anterior. Na posição de 240 cm a única diferença observada foi a redução da fração granulométrica dos sedimentos de silte médio para silte fino. No depósito localizado a 350 cm da desembocadura a redução do tamanho dos grãos foi bem evidente, sendo caracterizado por silte muito fino. A presença de grãos dispersos de carvão com fração granulométrica silte grosso era comum. Essas características foram preservadas a 420 cm da desembocadura.



### 3.2.4. DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO GERADO NO EXPERIMENTO QVB

A distribuição longitudinal do depósito gerado pela corrente de densidade de baixa concentração e vazão variada evidenciou diminuição expressiva da espessura do depósito da porção proximal em direção à porção distal do tanque de experimentação. Nos 80 cm iniciais do tanque, o depósito apresentou pouca variação de espessura, a qual correspondeu a valores em torno de 1,7 cm. Entre 90 cm e 130 cm de distância da desembocadura, a espessura do depósito diminuiu em média 1 cm a cada 20 cm de distância. No restante do tanque de experimentação a espessura do depósito variou de 1,2 a 0,5 cm em direção à porção distal (Figura 3.35).



**Figura 3.35:** Representação do depósito gerado pela corrente com vazão variada e baixa concentração (Experimento QVB; concentração = 10%) A) Espessura do depósito a cada 10 cm do tanque de experimentação B) Perfil de acumulação do depósito ao longo do tanque de experimentação. Região mais clara composta por maior concentração de sedimentos siliciclásticos em comparação com a região mais escura.

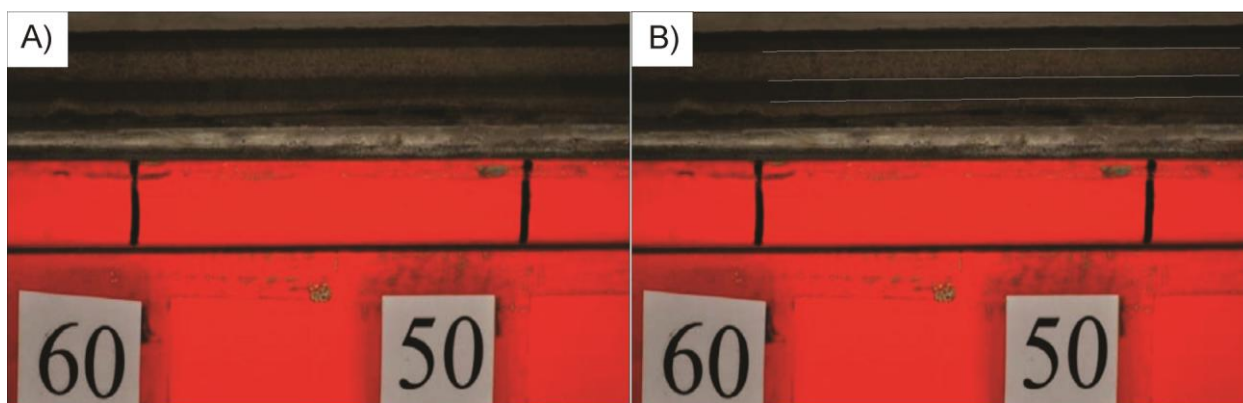
O depósito gerado apresentou quatro camadas distintas, as quais foram relacionadas às variações de vazão. Ressalta-se que o termo “camada” refere-se à “lâmina” ao fazer um aumento de escala e analogia com o registro geológico. A primeira (basal) e a terceira corresponderam às camadas mais claras e aos momentos de baixa vazão, enquanto que a segunda e quarta (superior) corresponderam às camadas relativamente mais escuras e aos momentos de alta vazão. Na posição 50 cm do tanque foram realizadas análises granulométricas pontuais de cada camada (Tabela 3.5).

A quantidade de material amostrado para a realização da análise granulométrica foi pequena e houve um problema ao colocar a amostra da camada superior no equipamento analisador de partículas. Conseqüentemente, não foi possível realizar a análise granulométrica desta camada. O depósito permaneceu cinco dias secando naturalmente no interior do tanque. Apesar de ainda estar molhado, estava mais consistente em relação aos outros depósitos onde a amostragem ocorreu, em média, dois dias após a realização do experimento. Por essa razão, foi possível realizar a amostragem pontual. Nos demais experimentos isso não foi possível, uma vez que os depósitos estavam muito molhados e se deformavam com facilidade.

	Primeira camada (Base) (%)	Segunda camada (%)	Terceira camada (Topo) (%)
<b>Argila</b>	2,92	3,99	1,95
<b>Silte muito fino</b>	1,36	2,21	0,98
<b>Silte fino</b>	2,95	4,73	1,94
<b>silte médio</b>	6,56	9,31	4,33
<b>Silte grosso</b>	26,76	32,68	19,85
<b>Areia muito fina</b>	<b>47,12</b>	<b>37,12</b>	<b>47,03</b>
<b>Areia fina</b>	12,33	9,95	22,47
<b>Areia Média</b>			1,45

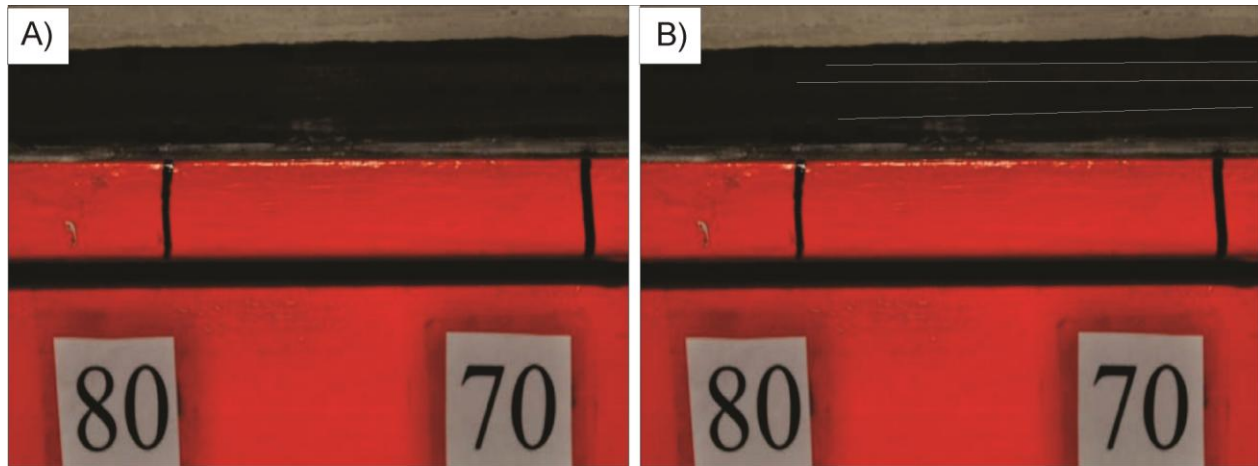
**Tabela 3.5:** Resultado da análise granulométrica das amostras pontuais coletadas das distintas camadas observadas no depósito, porcentagem em massa.

Em todas as camadas ocorreu a predominância da fração granulométrica areia muito fina. A camada basal possuía coloração clara e a presença de grãos grossos foi intensa. Na segunda camada ainda predominou a fração granulométrica areia muito fina, porém em menor quantidade em relação à camada basal. A porcentagem dos sedimentos mais finos aumentou. A terceira camada era constituída predominantemente por grãos de fração granulométrica mais grossa, o que foi evidenciado pela presença de grãos com tamanho correspondente a areia média. A porcentagem de grãos com fração granulométrica silte grosso, areia muito fina e areia fina foi elevada. O material predominante dessa camada foi o ballotini. A quarta camada (superior), apesar dos erros experimentais e da falta da análise granulométrica pontual, foi caracterizada através da descrição direta do depósito. A presença de grãos com fração granulométrica grossa era intensa. A presença de matriz era evidente. Em direção ao topo, observou-se a formação de gradação normal. Os grãos de carvão estavam espalhados aleatoriamente por todas as camadas, porém em menor quantidade na primeira e terceira camada (Figura 3.36).



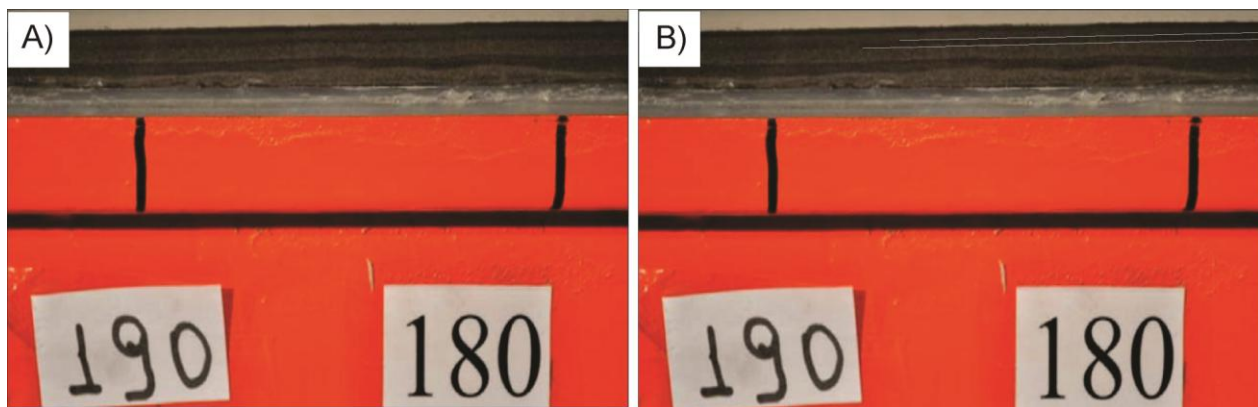
**Figura 3.36:** A) Depósito gerado no experimento com corrente de vazão variada e baixa concentração (Experimento QVB. Concentração = 10%), onde foi possível observar a formação de quatro camadas distintas. B) Ênfase às camadas geradas

A espessura de cada camada variou pelo comprimento do tanque. A partir da posição 76 cm, a terceira camada tornou-se gradativamente mais clara (Figura 3.37). A primeira camada (base) desapareceu na região intermediária/final do tanque de experimentação.



**Figura 3.37:** A) A terceira camada passou a ser gradativamente mais clara a partir de, aproximadamente, 76 cm da desembocadura. B) Ênfase às características descritas.

A distinção das quatro camadas tornou-se mais difícil na porção distal do depósito. A distinção entre a terceira e a quarta camada não foi muito clara em certas regiões. Não foram consideradas como uma única camada devido à presença de uma fina lâmina de material mais escuro entre elas, com aproximadamente 0,02 mm de espessura, onde predominava grãos de carvão (Figura 3.38).



**Figura 3.38:** A) Presença de lâmina pouco espessa e composta, predominantemente, por carvão entre a terceira e a quarta camada. Essa lâmina não era bem evidente dependendo da porção do depósito. B) Ênfase à lâmina de carvão entre a terceira e a quarta camada.

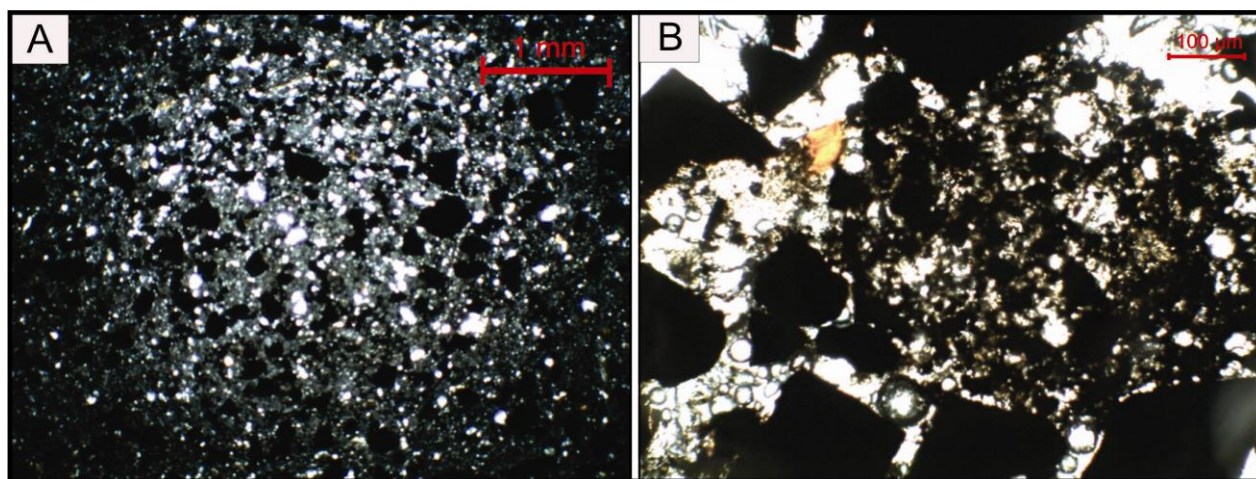
A partir da posição 330 cm não foram observadas variações texturais e o depósito tornou-se maciço. A espessura do depósito passou a ser muito fina (0,5 cm), o que prejudicou a sua caracterização (Figura 3.39).



**Figura 3.39:** Na porção distal do tanque de experimentação o depósito era maciço e pouco espesso, o que dificultou a sua descrição.

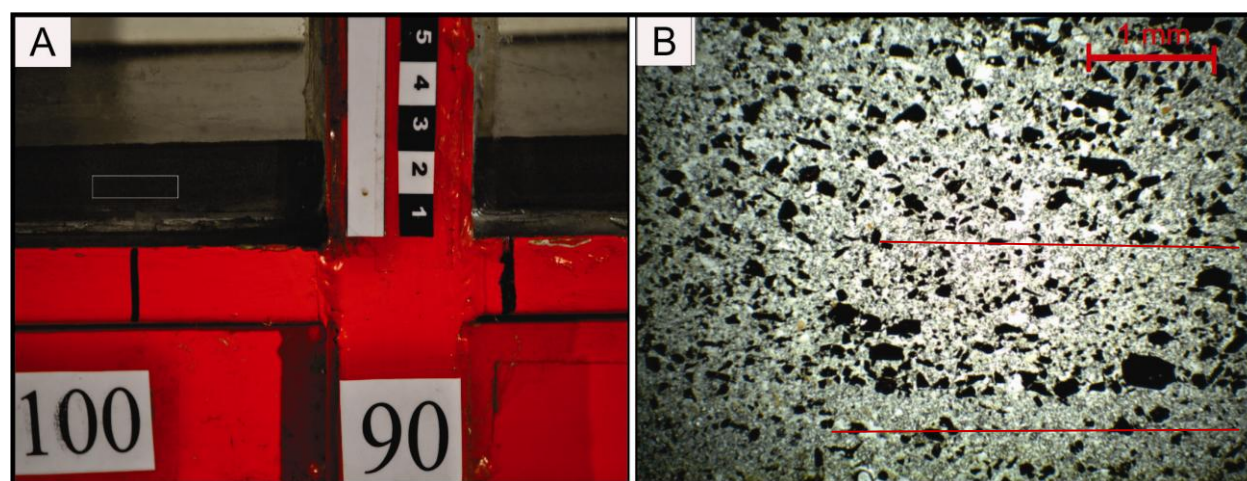
A análise microscópica do depósito a 50 cm da desembocadura permitiu distinguir duas camadas. A primeira camada (basal) e a segunda camada do depósito, observadas macroscopicamente, não estavam presente. A camada basal da lâmina (terceira camada do depósito) era composta por 40% ballotini com fração granulométrica silte grosso, por 25% carvão com tamanho de areia muito fina e 35% caulim como grão do arcabouço e compondo a matriz (Figura 3.40 A). Na camada superior (quarta camada do depósito) a concentração do grão de carvão aumentou (45%). Os grãos de ballotini (20%) possuíam tamanho silte médio e os grãos de caulim (35%) compunham a matriz (Figura 3.40B). As duas camadas possuíam grãos mal selecionados e textura caótica.





**Figura 3.40:** A) Camada basal composta por grãos de ballotini e carvão envoltos por matriz argilosa (nicóis cruzados); B) Camada superior com maior concentração de carvão e caulim (nicóis descruzados).

A 100 cm da desembocadura a porção do depósito analisada era composta por duas camadas (Figura 3.41A), as quais foram diferenciadas devido à diferença da concentração e fração granulométrica dos grãos de carvão. A camada basal era composta por 20% carvão com fração granulométrica silte médio, 40% ballotini com tamanho silte fino e 40% caulim compondo a matriz. A segunda camada foi caracterizada por 30% carvão com fração granulométrica areia muito fina, 25% ballotini com tamanho silte médio e 45% caulim. Foi possível identificar laminações plano paralelas (Figura 3.41 B).

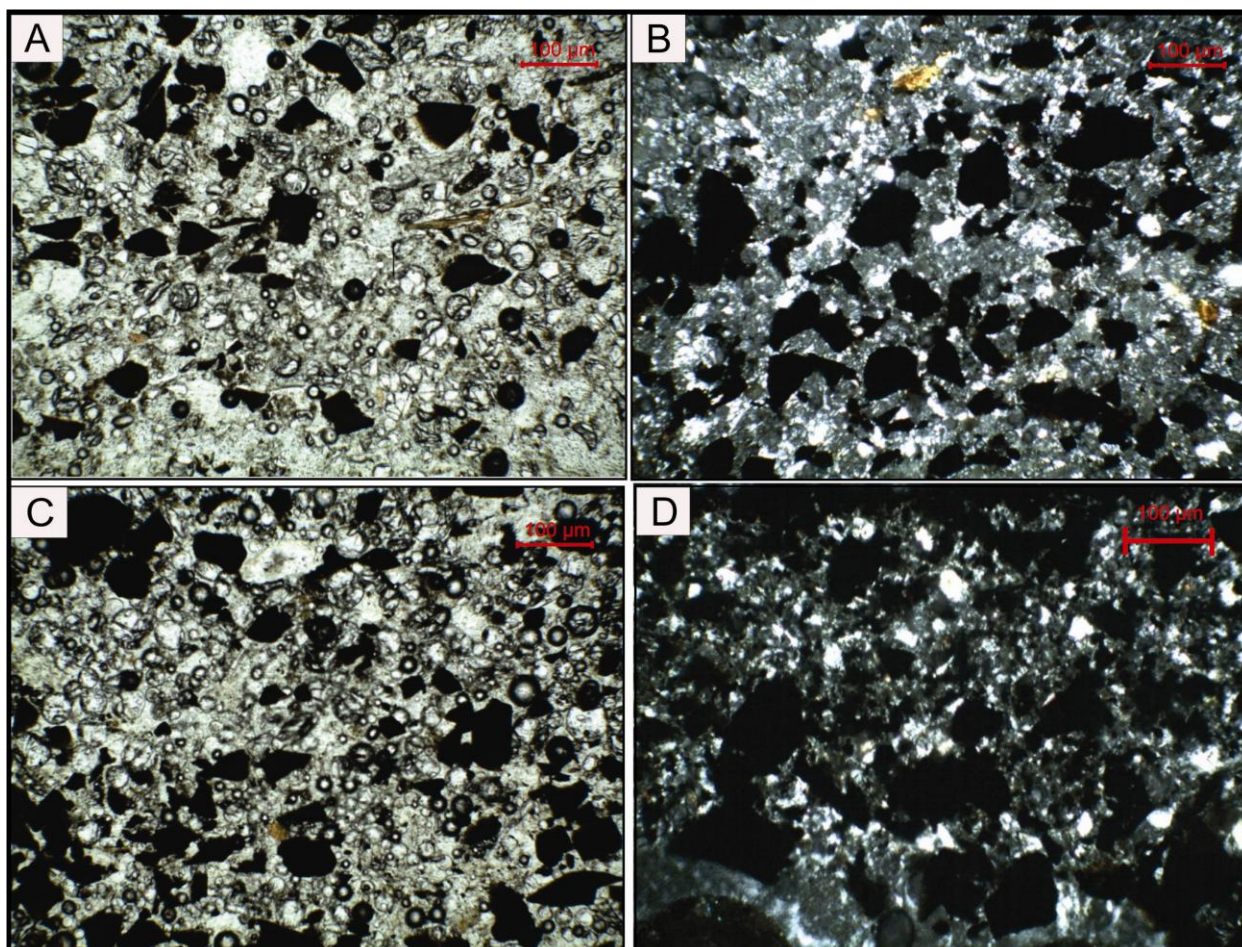


**Figura 3.41:** A) Posição do depósito aonde foi realizada a análise microscópica. Ênfase à localização da porção onde foi confeccionada a lâmina delgada; B) Contato entre a camada basal e a camada superior. Presença de laminações plano paralelas (nicóis descruzados).

A análise microscópica realizada a 170 cm da desembocadura evidenciou três camadas. A diferenciação entre elas foi sutil. A camada basal era composta por carvão com fração granulométrica areia muito fina, por ballotini com tamanho silte médio e caulim com tamanho silte fino, compondo a matriz (Figura 3. 42A). A camada intermediária possuía maior concentração de grãos de carvão com fração granulométrica um pouco maior em relação à camada anterior (Figura 3. 42B). A camada superior era composta por ballotini de fração granulométrica silte muito fino, por grãos de carvão de tamanho silte médio e caulim compondo a matriz (Figura 3. 42C). Bem no topo da lâmina ocorreu um nível onde os grãos de ballotini estavam ausentes, enquanto que a concentração de carvão e de caulim era elevada (Figura 3. 42D).

A diminuição de espessura do depósito bem como da fração granulométrica dos sedimentos foi bem evidente em relação à posição de amostragem anterior. A 240 cm da desembocadura foi possível distinguir três camadas com características semelhantes à descrição anterior, porém menos espessas. A camada inferior era composta por ballotini com fração granulométrica silte muito fino, carvão com tamanho silte médio e caulim compondo a matriz. A camada intermediária era pouco espessa, com distribuição granulométrica similar à camada basal, porém com concentração de carvão um pouco mais elevada. A camada superior possuía poucos grãos de ballotini, os quais apresentavam fração granulométrica de silte muito fino. A presença de carvão e caulim era intensa. As amostras coletadas a 350 cm e 400 cm eram pouco espessas, o que não favoreceu a confecção de boas lâminas delgadas.





**Figura 3. 42:** A) Camada basal composta por grãos de carvão, ballotini e matriz argilosa (nicóis descruzados); B) Concentração de carvão um pouco mais elevada na camada intermediária em relação à camada anterior (nicóis cruzados); C) Grãos com fração granulométrica relativamente menor em comparação à camada intermediária (nicóis descruzados); D) Nível composto predominantemente por grãos de carvão e caulim com fração granulométrica silte muito fino (nicóis cruzados).

### 3.2.5. ANÁLISE DOS DEPÓSITOS

As análises dos depósitos gerados permitiram inferir sobre a capacidade de transporte do fluxo e sobre a influência da vazão e concentração das correntes na deposição dos sedimentos. A análise das imagens geradas pelo equipamento de ultra-som auxiliou no entendimento dos mecanismos de transporte e deposição dos grãos, bem como na elaboração do modelo deposicional (tratado no subitem 3.2.6).

Em relação à distribuição longitudinal dos depósitos foi possível observar a tendência de acúmulo nas porções mais proximais do tanque, com diminuição das espessuras e das frações



granulométricas em direção à porção distal. Esse comportamento foi mais evidente nas correntes de baixa concentração, em comparação as correntes de alta concentração, onde a variação da espessura do depósito foi menos acentuada (Figura 3.43). Conseqüentemente, foi possível concluir que os depósitos de turbiditos devem se adelgaçar mais drasticamente do que os depósitos gerados por fluxos laminar, como o *debris flow*.



**Figura 3.43:** A espessura do depósito diminuiu em direção à porção distal do tanque de experimentação (cm). Essa diferenciação foi mais evidente nos depósitos gerados por fluxos de baixa concentração (10%) em relação aos gerados por fluxos de alta concentração (20%). Fotos representativas dos experimentos A) QVB – vazão variada e baixa concentração e B) QVA – vazão variada e alta concentração.

A análise granulométrica evidenciou a ocorrência de deposição diferenciada. Em geral, na região proximal do tanque de experimentação ocorreu o predomínio das frações granulométricas grossas, como silte grosso e areia fina (de 0 cm a 100 cm). Em direção à porção intermediária do tanque (de 170 cm a 240 cm), o tamanho dos sedimentos passou para silte médio. Na porção distal (de 300 cm a 450 cm) prevaleceram os grãos de frações granulométricas mais finas. Essa segregação dos sedimentos foi mais evidente nos depósitos gerados pelas correntes de baixa concentração em comparação com os gerados pelas correntes de alta concentração. Nas correntes com baixa concentração a ação da turbulência foi predominante. Nas correntes com alta concentração ocorreu atuação da pressão dispersiva, colisão entre os grãos e a deposição foi dificultada (*hindering settling*). O padrão de deposição foi decorrente do caráter depletivo da

corrente, o qual ocasionou a segregação dos grãos. Essa tendência de diminuição de espessura do depósito e das frações granulométricas é observada nos registros geológicos dos turbiditos.

A taxa de deposição dos sedimentos foi controlada pelas frações granulométricas e densidade dos grãos, assim como pela concentração e pela vazão do fluxo. A influência das frações granulométricas e da densidade dos grãos na taxa de deposição foi relacionada à velocidade de queda dos mesmos. Para os grãos de mesma densidade, os sedimentos de fração granulométrica maior depositaram-se antes dos sedimentos de menor fração granulométrica. Para os grãos de densidade diferente, os sedimentos com maior massa específica depositaram-se antes dos sedimentos menos densos. A presença dos sedimentos coesivos modificou a interação entre as partículas. A alta coesão do fluxo dificultou a decantação (*hindered settling*), mantendo os grãos em suspensão e retardando sua sedimentação.

A variação da concentração afetou a taxa de deposição. A influência da concentração dos sedimentos incidiu sobre a massa de grãos passíveis de serem depositados. O aumento da concentração gerou depósitos com maior espessura. A diminuição da concentração gerou depósitos menos espessos. Isso foi coerente, uma vez que conforme aumentou a concentração ocorreu aumento na quantidade dos grãos, o que ocasionou a maior espessura dos depósitos gerados.

A variação da vazão alterou a dinâmica da corrente e as características das camadas depositadas. O aumento da vazão implicou no aumento da massa do depósito. Os grãos foram transportados para mais longe, o que fez com que o comprimento do depósito aumentasse. A variação de espessura dos depósitos gerados pelas correntes de alta concentração foram menos expressivas em comparação com os depósitos gerados pela corrente de baixa concentração.

A distribuição vertical macroscópica dos sedimentos evidenciou a formação de camadas bem definidas. Nos experimentos com corrente de vazão variada e alta concentração (Experimento QVA) e com corrente de vazão constante e alta concentração (Experimento QCA) prevaleceu à formação de duas camadas. No experimento com vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB) foram geradas distintas camadas nos 50 cm iniciais do tanque de experimentação. Essas camadas foram consideradas influências experimentais, não retratando de fato o ocorrido em eventos naturais, devido à proximidade com o difusor de bucal simples. Nas demais partes, o depósito foi caracterizado por duas camadas bem definidas. No experimento com vazão variada e baixa concentração (Experimento QVB) foram geradas quatro camadas, as

quais foram desaparecendo em direção à porção distal. A análise das imagens de ultra-som auxiliou no entendimento da formação de tais estruturas, as quais foram relacionadas às variações de vazão. Nos momentos de baixa vazão foram depositadas as camadas mais claras, onde a presença de sedimentos mais grossos era mais elevada. Nos momentos de alta vazão foram depositadas as camadas mais escuras, onde a presença de carvão era mais intensa.

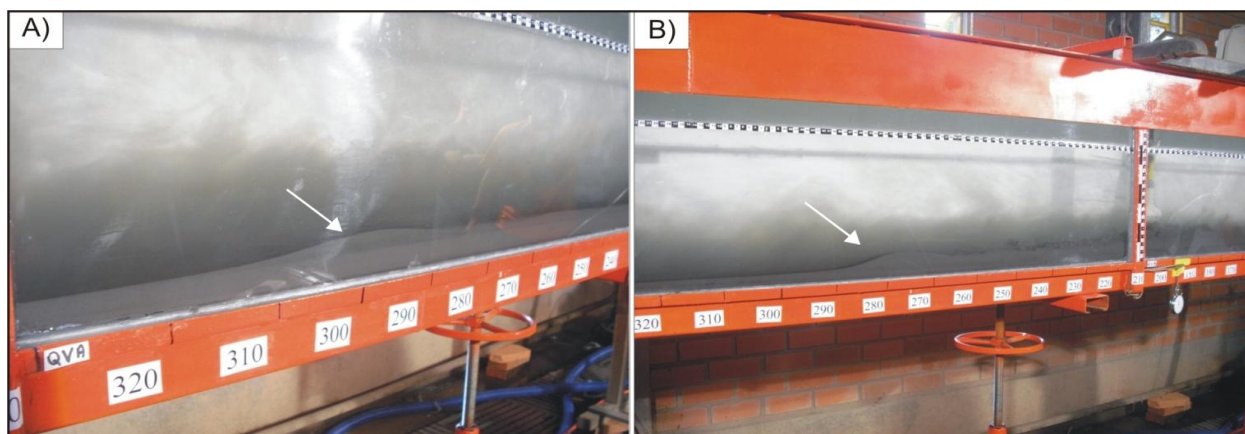
A análise granulométrica das correntes com vazão constante revelou uma distribuição vertical com gradação direta. Ou seja, ocorreu predomínio de frações granulométricas grossas na base do depósito e das frações granulométricas mais finas no topo. Essa distribuição é característica das correntes de turbidez. Em geral, as camadas basais dos depósitos gerados foram caracterizadas por uma coloração cinza claro e as camadas superiores foram caracterizadas por grãos com frações granulométricas mais finas, coloração mais escura e opaca.

Na corrente com vazão constante e baixa concentração (Experimento QCB) foram geradas estruturas sedimentares, como estratificações cruzadas de baixo ângulo. Essas estruturas foram geradas por correntes unidirecionais constantes, devido ao movimento por tração. Isso foi coerente, uma vez que as correntes com baixa concentração apresentaram uma taxa de deposição menor e houve maior intervalo de tempo para a geração de estruturas sedimentares. Com relação aos depósitos gerados por correntes com alta vazão, foi caracterizada uma maior homogeneidade granulométrica e o aspecto maciço das camadas foi mais evidente.

Com análise das imagens geradas pelo equipamento de ultra-som foi possível identificar os mecanismos de transporte e deposição das correntes de densidade. O deslocamento da porção superior e da subcamada viscosa do fluxo foi bem evidente nas imagens. Porém, a camada basal cisalhante confundiu-se com o depósito em formação, o que dificultou a sua delimitação. O depósito se formou por progressiva aggradação na parte basal cisalhante, considerando-se um ponto fixo de observação. A deposição do fluxo laminar ocorreu por congelamento em massa. O congelamento do fluxo e geração do depósito na região de *plug*, por fricção ou imobilização coesiva, não foi instantâneo ao fechamento da vazão. Devido à inércia do movimento pela ação da gravidade, o fluxo congelou após alguns segundos do fim do experimento. Esse comportamento pode ser observado nos perfis de velocidade. Os grãos mais finos presentes na nuvem turbulenta/diluída foram transportados grão-a-grão. A deposição ocorreu a uma taxa menor, por decantação e, secundariamente, por tração.

A análise das imagens de ultra-som evidenciou que a distinção entre as duas camadas observadas nos depósitos foi reflexo da diferença de densidade intrínseca das correntes. Os sedimentos siliciclásticos tenderam a se deslocar na porção basal da corrente, uma vez que representavam os grãos mais densos. Por outro lado, os sedimentos menos densos (carvão) tenderam a se deslocar na porção superior da corrente. A deposição do fluxo laminar ocorreu por congelamento em massa. Portanto, a segregação dos grãos no interior da corrente devido à diferença de densidade foi representada no depósito. Os grãos mais finos transportados em suspensão na nuvem turbulenta geraram a gradação normal observada no topo do depósito. Além disso, a taxa de sedimentação da porção basal concentrada foi maior do que a da porção superior turbulenta. Conseqüentemente o fluxo desacelerou mais rapidamente na porção basal em comparação à porção superior, a qual apresentou valores de velocidade mais homogêneos.

As oscilações da vazão geraram perturbações internas nas correntes de densidade, as quais foram representadas pelas ondas formadas na interface da porção basal com a porção superior diluída em todos os experimentos. As maiores amplitudes de ondas foram geradas nos picos de vazão dos experimentos QVA e QVB (Figura 3.44).



**Figura 3.44:** Ondas geradas na interface da porção densa basal e da porção superior turbulenta/diluída A) Experimento QVA (Vazão variada e alta densidade – 20%) e B) Experimento QVB (Vazão variada e baixa densidade – 10%).

Essas ondas foram induzidas pelos picos de vazão. Nos experimentos com vazão variada, a formação das ondas não foi considerada erro experimental, uma vez que o aumento da vazão foi previsto. Porém, nos experimentos com vazão constante a geração das ondas foi considerada erros experimentais. Esse comportamento foi decorrente da dificuldade em controlar o registro da vazão e manter um valor constante.

A passagem da onda não influenciou a parte inferior do depósito da camada cisalhante. Apenas os sedimentos do topo do depósito foram deslocados. Os sedimentos no fluxo laminar denso acompanharam o movimento da onda. Em certos locais, após a passagem da onda, os sedimentos mais finos do topo do fluxo laminar entraram em suspensão, favorecendo o desenvolvimento da turbulência.

### **3.2.6. MODELO DEPOSICIONAL**

O modelo deposicional foi elaborado com base em análises diretas e indiretas dos depósitos, bem como das imagens geradas pelo equipamento de ultra-som médico. O modelo deposicional foi proposto considerando correntes de alta concentração e de baixa concentração, bem como considerando fluxos com velocidades constantes (fluxos permanentes) e com velocidades variáveis (fluxos transientes).

Concluiu-se que a taxa de deposição das correntes de densidade foi controlada pela velocidade de queda dos grãos, pela concentração dos sedimentos em suspensão e pela vazão da corrente. Esses fatores apresentaram relação direta com a deposição dos sedimentos.

Os valores de velocidade de queda (tratados no item 3.3), concentrações de sedimentos e vazão mais elevados implicaram em uma maior espessura do depósito gerado. Nessas condições, os sedimentos finos demoraram mais tempo para decantar e a velocidade da corrente foi mantida elevada por mais tempo. Conseqüentemente, os grãos maiores foram transportados para mais longe e o comprimento do depósito aumentou.

A viscosidade e a concentração do fluxo exerceram influencia sobre a velocidade de queda das partículas. Com o aumento da concentração, a velocidade de queda e a interação entre os grãos diminuíram. Isso foi decorrente i) da queda das partículas, que ocasionou o movimento ascendente de água, ii) do empuxo das partículas, o qual diminuiu em função da maior densidade

do fluído, iii) da interferência entre as partículas que atuou como um elemento contrário à deposição natural dos grãos (decantação impedida – *hindered settling*) (Middleton, 1966b; Kneller & Branney, 1995).

A existência de uma grande faixa granulométrica de sedimentos possibilitou a segregação dos grãos de acordo com a velocidade de queda. Sendo assim, foi gerado depósito com gradação normal conforme a redução da velocidade da corrente e da intensidade da turbulência.

A presença de siltes e argilas interferiu significativamente no comportamento hidrodinâmico da corrente. Os sedimentos coesivos possuíam a tendência de formar flocos, o que alterou a sua velocidade de queda. Portanto, esses sedimentos se comportaram de maneira distinta em relação às areias quando submetidos a ação de um mesmo escoamento, mantendo-se em suspensão por mais tempo. Conseqüentemente, a água se tornou turva e a decantação ocorreu após um longo período de tempo.

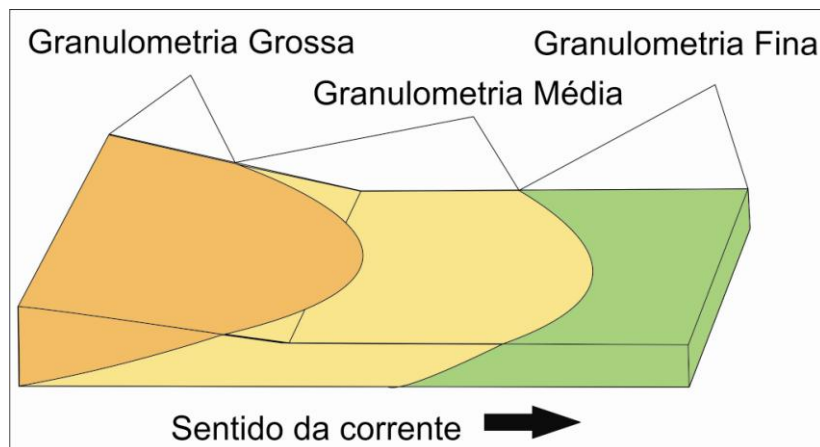
Nas correntes de turbidez de alta densidade, a grande quantidade de sedimentos causou diversos efeitos no comportamento do fluxo (mecanismo de transporte) e na deposição. O fluído mais denso aumentou a energia potencial e a quantidade de movimento dos escoamentos. Inferiu-se que a viscosidade da mistura foi alterada com o aumento da concentração dos sedimentos, a qual passou a apresentar comportamento não-Newtoniano. A velocidade de queda foi menor quanto maior foi a concentração da mistura.

As correntes de densidade simuladas foram caracterizadas como depletivas. Esse comportamento foi influenciado pelas interações das correntes de densidade com o fluído ambiente durante o seu escoamento. Entre estas interações, destacou-se a entrada da água circundante na cabeça e no corpo da corrente através de fendas presentes na cabeça, ocasionando o desprendimento de vórtices de Kelvin-Helmholtz. Esse fato, aliado à deposição dos sedimentos, ocasionou a redução do excesso de densidade das correntes em relação ao fluído ambiente.

O caráter bipartido das correntes simuladas controlou a concentração dos sedimentos em suspensão. A porção basal, caracterizada pela maior concentração de sedimentos, apresentou uma porção inferior com movimento cisalhante (onde a deposição ocorreu por agitação) sobreposta por uma porção com fluxo laminar (onde a deposição ocorreu por congelamento *em massa*). Na porção superior menos concentrada os grãos foram transportados por turbulência e a deposição ocorreu por decantação e tração.

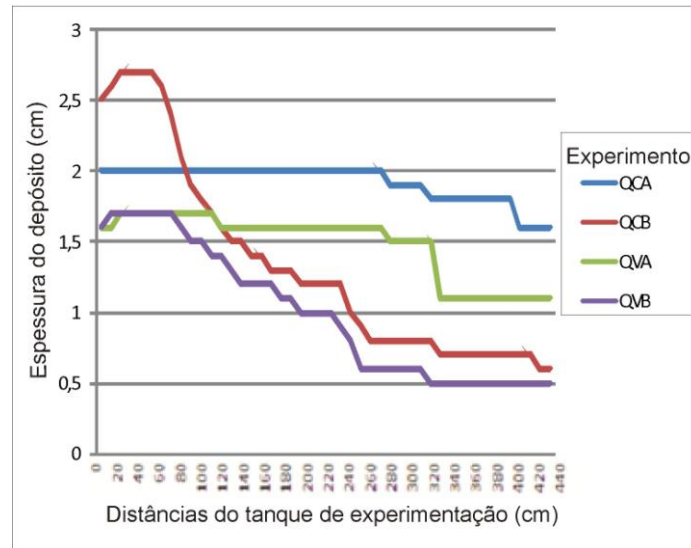
Portanto, a vazão inicial e a concentração de sedimentos utilizados influenciaram o desenvolvimento e a deposição das correntes de densidade. A vazão exerceu influência direta sobre a velocidade de avanço, sobre as espessuras dos depósitos e sobre a distribuição granulométrica dos sedimentos. A tendência geral de evolução da corrente (padrão de variação da velocidade e da deposição) foi determinada pela vazão. A concentração foi responsável pela magnitude dessas variações.

As simulações físicas realizadas permitiram a construção de um modelo deposicional no qual os fluxos de densidade bipartidos produziram espessos corpos de arenitos tipicamente bipartidos, com diminuição das frações granulométricas da porção proximal em direção à porção distal (Figura 3.45). Esse comportamento foi decorrente da segregação granulométrica dos sedimentos durante o escoamento das correntes.



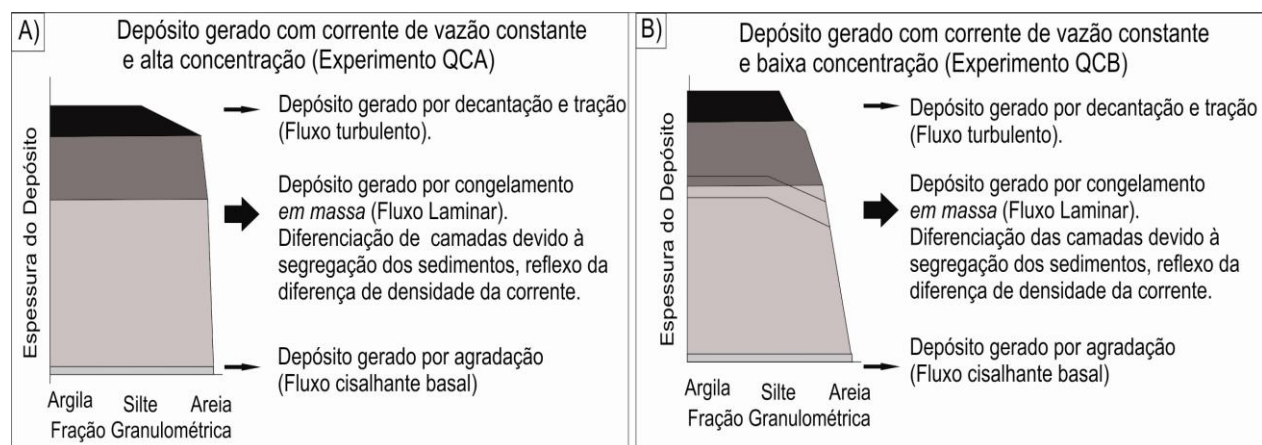
**Figura 3.45:** Distribuição granulométrica segundo o modelo geológico. Os sedimentos de fração granulométrica maior depositaram-se na região proximal. Em direção à porção distal foram gerados extensos corpos de arenito com fração granulométrica menor.

As correntes de baixa concentração (Experimento QCB e Experimento QVB) geraram depósitos menos espessos em comparação com as correntes de alta concentração (Experimento QCA e Experimento QVA) (Figura 3.46).



**Figura 3.46:** Comparação da espessura dos depósitos nos distintos experimentos (Experimento QCA: vazão constante e alta concentração; Experimento QCB: vazão constante e baixa concentração; Experimento QVA: vazão variada e alta concentração; QVB: vazão variada e baixa concentração).

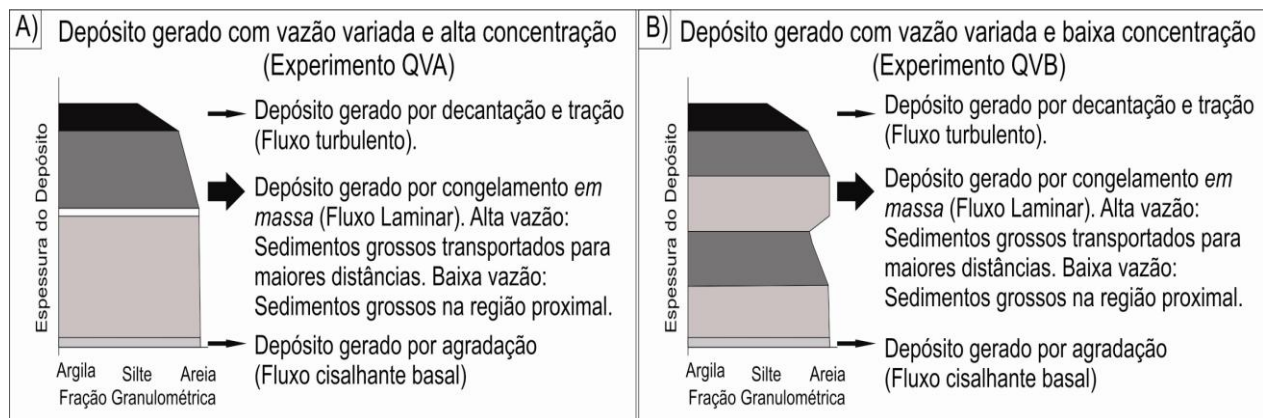
A variação granulométrica vertical e horizontal foi menos evidente nas correntes de maior concentração (Figura 3.4A) em relação às correntes de menor concentração (Figura 3.4B).



**Figura 3.47:** Perfil vertical esquemático do depósito gerado nos experimentos com vazão constante, com seus respectivos mecanismos deposicionais. A) Corrente com alta concentração apresentou menor variação granulométrica; B) Corrente com baixa concentração apresentou notável diminuição granulométrica em direção ao topo.



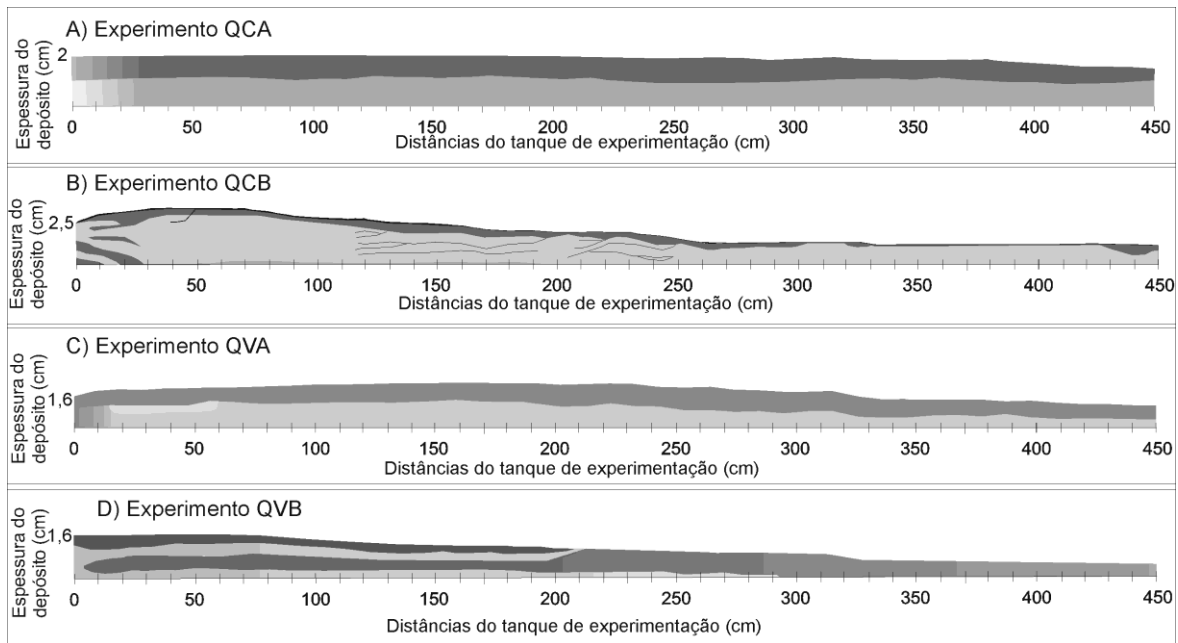
As correntes com vazão variada geraram camadas relacionadas aos picos de vazão. Considerando um ponto de observação fixo, percebeu-se que os momentos de baixa vazão originaram camadas compostas por grãos com fração granulométrica grossa. Isso foi decorrente da menor capacidade de transporte da corrente, que não foi capaz de transportar os sedimentos mais densos para as porções distais do tanque de experimentação (Figura 3.4A). Os altos picos de vazão geraram camadas caracterizadas por sedimentos com tamanho mais fino, uma vez que os grãos de maior fração granulométrica foram transportados para as porções distais do tanque (Figura 3.4B).



**Figura 3.48:** Perfil vertical esquemático do depósito gerado nos experimentos com vazão variada, com seus respectivos mecanismos deposicionais. A) Corrente com alta concentração apresentou camadas decorrentes da variação da vazão e reflexo da diferença de densidade intrínseca da corrente; B) Corrente com baixa concentração apresentou notáveis camadas geradas pela variação da vazão.

As camadas geradas nos experimentos com vazão constante (Experimento QCA e Experimento QCB) foram consequência da concentração diferenciada de sedimentos no interior das correntes. A porção basal do fluxo bipartido, caracterizada pelo fluxo laminar, apresentou essa variação vertical de densidade. Os sedimentos mais densos deslocaram-se na porção inferior e os menos densos na porção superior. A deposição do fluxo laminar ocorreu por congelamento *em massa*. Portanto, o depósito registrou a segregação dos grãos no interior da corrente, gerando uma camada basal composta predominantemente por sedimentos siliciclásticos mais grossos e uma camada superior composta por sedimentos siliciclásticos mais finos e com maior concentração de carvão. Porém, os grãos de carvão estavam distribuídos aleatoriamente nas duas camadas. Vale ressaltar que essas camadas corresponderam à fácies distintas dentro de uma camada. Os sedimentos mais finos transportados em suspensão na nuvem turbulenta geraram a gradação

normal observada no topo do depósito. Esse processo foi responsável pela diferenciação das camadas na região distal nos experimentos com vazão variada (Experimento QVA e Experimento QVB). Concluiu-se que todos os depósitos apresentaram diminuição de espessura em direção à porção distal do depósito. Além disso, distintas camadas e distintas fácies dentro de uma única camada foram identificadas no decorrer da distribuição longitudinal do depósito (Figura 3.49).



**Figura 3.49:** Esquema da distribuição longitudinal dos depósitos com ênfase à distribuição lateral das fácies sedimentares e à variação de espessura. A) QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; B) QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; C) QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; D) QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%.

### 3.3. CONDIÇÕES DE SEMELHANÇAS

Entende-se como simulação física ou modelagem física um “método que reproduz, em menor escala e sob condições controladas em laboratório, um determinado sistema físico que envolve fenômenos de grande magnitude em termos de dimensões físicas” (Motta, 1972). O sistema físico a ser reproduzido chama-se protótipo e o sistema físico reproduzido chama-se modelo.

Para que a modelagem física seja considerada representativa é necessário estabelecer a relação de escala entre os experimentos e os eventos naturais. O número de Reynolds, o número de Froude e a velocidade de queda correspondem aos principais parâmetros adimensionais utilizados na

relação de escala (Middleton, 1966a; Alexandre & Mulder, 2001; Kneller & Buckee, 2000; Guirro, 2008). Porém, é fisicamente impossível garantir condições de igualdade simultâneas entre os dois primeiros parâmetros em escala reduzida. Nas simulações de fluxos gravitacionais considera-se que as forças de inércia predominam sobre as forças viscosas. Portanto, impõe-se igualdade em relação ao número de Froude (Middleton, 1966a; Mota, 1972; Alexandre & Mulder, 2001; DelRey, 2006; Kneller & Buckee, 2000; Guirro, 2008). Além disso, medir a viscosidade da corrente é um procedimento complicado. Durante a análise dos parâmetros dinâmicos, geométricos e cinemáticos das correntes de densidade simuladas, foi possível relacionar qualitativamente o número de Reynolds com as características observadas.

O número de Froude densiométrico expressa a relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais envolvidas no fluxo:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{RgCh}} \quad (3)$$

onde:  $u$  - velocidade do fluxo;  $g$  - aceleração da gravidade;  $C$  - concentração volumétrica;  $h$  - altura do fluxo;  $R$  - densidade imersa do sedimento.

A concentração volumétrica corresponde ao volume de sedimento em relação ao volume da mistura, podendo ser determinada a partir das massas específicas da mistura (água + sedimento) ( $\rho_m$ ), dos sedimentos ( $\rho_s$ ) e da água ( $\rho_a$ ):

$$C = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_s - \rho_a} \quad (4)$$

A densidade imersa do sedimento é obtida em função das massas específicas dos sedimentos ( $\rho_s$ ) e da água ( $\rho_a$ ):

$$R = \frac{\rho_s}{\rho_a} - 1 \quad (5)$$

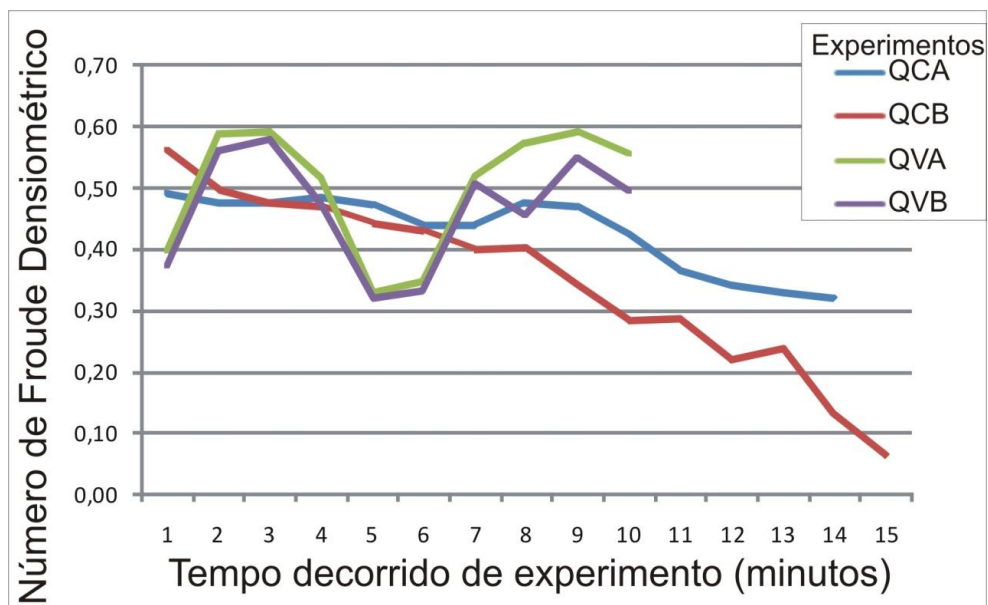
Fluxos que possuem número de Froude menor do que 1 são denominados subcríticos ou tranquilos (fluxo inferior). Fluxos com número de Froude igual a 1 são denominados críticos. Fluxos com número de Froude maior do que 1 são denominados supercríticos ou rápidos (fluxo superior).

O número de Froude (equação 3) expressa a condição de semelhança dinâmica do fluxo. Os valores da velocidade de avanço e altura da corrente foram medidos a cada um minuto de experimento, através das imagens e dados obtidos com o ultra-som médico e com o equipamento UVP (Tabela 3.6).

Tempo de ensaio (min)	Velocidade de avanço (cm/s)				Altura da corrente (cm)			
	QCA	QCB	QVA	QVB	QCA	QCB	QVA	QVB
1	10,0	8,5	6,0	6,7	1,8	2,0	1,0	2,8
2	11,4	8,0	12,3	11,3	2,5	2,3	1,9	3,5
3	11,4	7,9	13,1	10,0	2,5	2,4	2,2	2,5
4	11,1	7,5	8,9	6,2	2,3	2,2	1,3	1,5
5	11,3	7,2	5,6	4,6	2,5	2,3	1,4	1,8
6	10,4	6,9	7,1	5,0	2,5	2,2	1,8	2,0
7	10,1	6,5	9,6	7,1	2,3	2,4	1,5	1,7
8	9,7	6,1	11,0	6,5	1,8	2,0	1,6	1,8
9	9,3	5,6	13,3	9,3	1,7	2,4	2,2	2,2
10	9,1	4,8	12,2	7,1	2,0	2,5	2,1	1,8
11	8,0	4,8			2,1	2,4		
12	7,3	3,7			2,0	2,5		
13	6,3	3,3			1,6	1,7		
14	6,2	1,8			1,6	1,6		
15		0,9				1,7		
Média	9,4	5,6	9,9	7,4	2,1	2,2	1,7	2,2

**Tabela 3.6:** Velocidade de avanço e altura da corrente (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração=20%;Baixa concentração=10%).

A determinação do número de Froude densiométrico no decorrer do tempo indicou fluxos subcríticos, com valores entre 0,32 e 0,49 no experimento QCA; entre 0,06 e 0,56 no experimento QCB; entre 0,33 e 0,59 no experimento QVA e entre 0,32 e 0,56 no experimento QVB (Figura 3.).



**Figura 3.50:** Número de Froude Densimétrico (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração=20%;Baixa concentração=10%).

As correntes simuladas corresponderam aos fluxos subcríticos monitorados na natureza (Figura 3., os quais foram simulados na maioria dos experimentos em escala reduzida.

Experimentos	Número de Froude Densimétrico					Concentração volumétrica(%)	Espessura do fluxo (m)	Velocidade média (m/s)
	0	0,5	1	1,5	2			
QCA		—				20	0,021	0,094
QCB	—	—				10	0,022	0,056
QVA		—				20	0,017	0,099
QVB		—				10	0,022	0,074
Eventos								
Monterey 1	—					5 - 10	100	2 a 4
Monterey 2	—					0,3 - 10	100	2 a 20
Navy 1		●				0,1 - 1	25	1
Navy 2			—			1 - 2	10	1,5 a 2
Navy sec. 2			●			0,2	20	0,73
Navy sec. 3				●		0,1	25	0,7
Navy sec. 4				●		0,04	15	0,32
Navy sec. 5	●					0,04	75	0,12
Silver Ab. Pl.		●				0,07	35	3
Lago Walenstadt	—	—				0,01 - 0,02	5 a 10	0,06
Hueneme Fan			—			0,4	10 a 15	0,75
Cadeia Meso-Atl.	—	—				3 - 12	30	1,5 a 4
Bute Inlest st. 1-2					—	1 - 0,5	30 a 40	3,35
Bute Inlest st. 2-3		—	—			0,5 - 0,3	6 a 22	0,75

**Figura 3.51:** Comparação do Número de Froude Densimétrico e parâmetros de fluxos gravitacionais monitorados na natureza com os simulados. Modificado de Zeng & Lowe (1997) e Guirro (2008) (QCA: Experimento com vazão constante e alta concentração; QCB: Experimento com vazão constante e baixa concentração; QVA: Experimento com vazão variada e alta concentração; QVB: Experimento com vazão variada e baixa concentração. Alta concentração = 20%; Baixa concentração = 10%).

Na natureza as correntes de densidade podem atingir velocidades em torno de 30 m/s, alturas da ordem de centenas de metros e são capazes de mobilizar volume da ordem de centenas de quilômetros cúbicos de sedimentos (Kneller & Buckee, 2000). As informações obtidas com o monitoramento de eventos naturais correspondem às correntes de menor magnitude.

A velocidade de queda representa o comportamento hidrodinâmico das partículas em uma água em repouso e é utilizada no aumento de escala (*upscaling*) das frações granulométricas do modelo. A redução do tamanho dos grãos é realizada mantendo-se constante a razão entre a velocidade de queda dos grãos ( $w$ ) e a velocidade de avanço corrente ( $v$ ), tanto no protótipo como no modelo (Middleton, 1966a):

$$\left(\frac{w}{v}\right)_{\text{protótipo}} = \left(\frac{w}{v}\right)_{\text{modelo}} \quad (6)$$

Foram determinados os valores de velocidade de queda individual dos materiais (Tabela 3.7) e da mistura utilizados nos experimentos.

	<b>Carvão</b>	<b>Ballotini</b>	<b>Caulim</b>
<b>Velocidade de Queda Média (mm/s)</b>	0,03 a 64,52	0,28 a 60,61	0,27 a 16,67
<b>Tamanho dos grãos (moda) (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	13 a 500	30 a 100	12 a 25

**Tabela 3.7:** Limites da variação da velocidade de queda para cada material, com a fração granulométrica correspondente.

A maioria dos grãos de carvão coletados (3,36 g) possuía velocidade de queda de 1,48 mm/s e tamanho de 63  $\mu\text{m}$ . A maior parte dos grãos de ballotini (2,05 g) possuía velocidade de queda de 4,73 mm/s e fração granulométrica de 63  $\mu\text{m}$ . Portanto, para os grãos do mesmo tamanho a velocidade de queda do ballotini foi superior à do carvão. Isso está coerente uma vez que a massa específica do ballotini é maior do que a do carvão. A maioria dos grãos de caulim coletados (5,95 g) possuía velocidade de queda de 1,55 mm/s e tamanho do grão 10  $\mu\text{m}$ .

Os experimentos realizados possuíam 40% de material coesivo e 60% de material não coesivo. A fim de analisar a influência do caulim do comportamento do fluxo, calculou-se a velocidade de queda da mistura. A amostra ensaiada era composta por 40 g de carvão, 12 g de ballotini e 16 g de caulim (Tabela 3.8).



Altura da queda (mm)	Tempo de Coleta das Amostras (s)	Velocidade de Queda Média (mm/s)	Tamanho dos grãos (moda) da mistura ( $\mu\text{m}$ )	Quantidade de material coletado (g)
2000	90	22,22	125	1,89
2000	180	11,11	125	1,85
2000	270	7,41	106	2,19
2000	360	5,56	90	1,84
2000	450	4,44	85	1,6
2000	540	3,7	80	1,48
2000	630	3,17	75	1,46
2000	720	2,78	71	1,43
2000	810	2,47	71	1,53
2000	900	2,22	71	1,94
2000	990	2,02	62	2,14
2000	1080	1,85	56	1,92
2000	1170	1,71	53	1,91
2000	1260	1,59	28	2,01
2000	1350	1,48	25	1,9
2000	1440	1,39	23	1,61
2000	1530	1,31	56	1,37
2000	2670	0,75	50	1,09
2000	4470	0,45	25	2,59

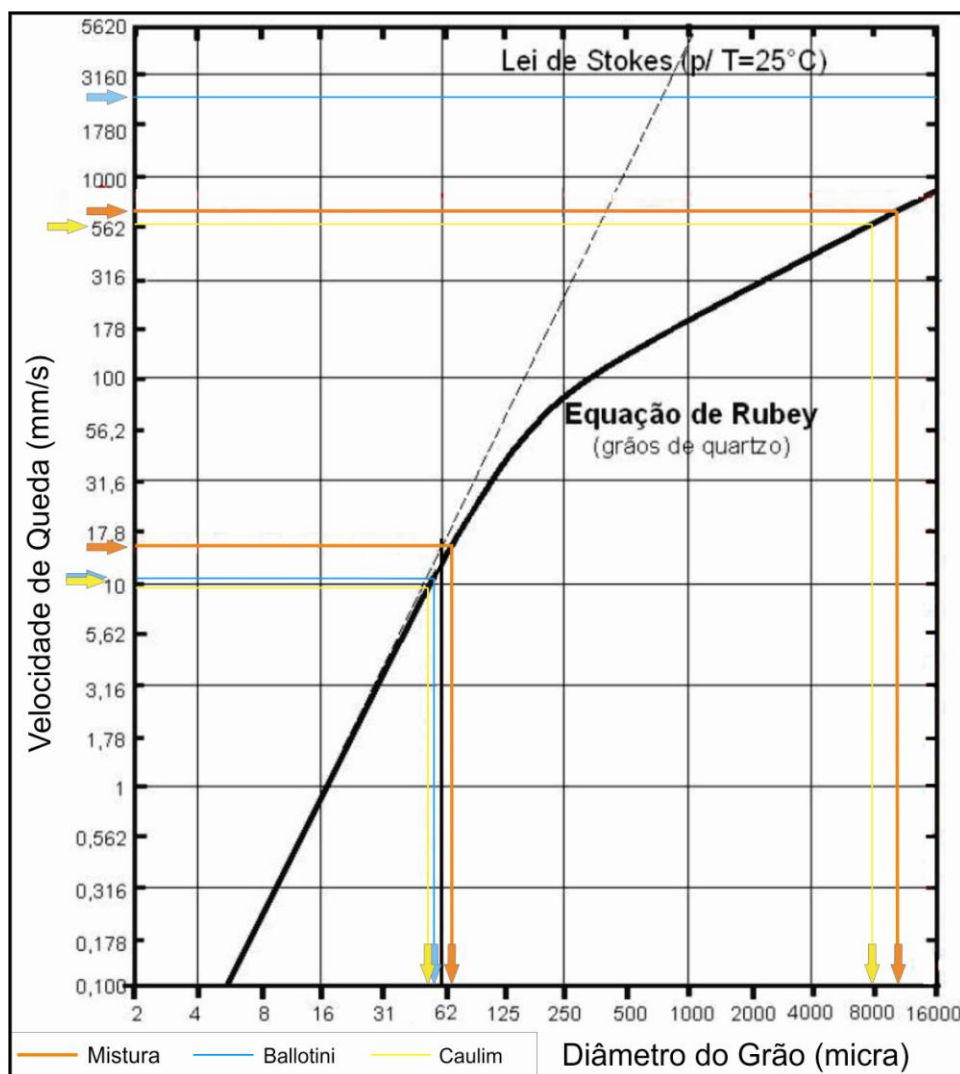
**Tabela 3.8:** Velocidade de queda dos sedimentos presentes na mistura utilizada nas simulações físicas.

Os sedimentos da mistura possuíam velocidade de queda entre 0,45 mm/s (grãos com tamanho 25  $\mu\text{m}$ ) e 22,22 mm/s (grãos com tamanho 125  $\mu\text{m}$ ). A maioria dos grãos coletados (2,59 g) possuía velocidade de queda de 0,45 mm/s e fração granulométrica de 25  $\mu\text{m}$ . A moda do tamanho dos grãos não variou significativamente, predominando a fração granulométrica areia muito fina e silte.

Os valores de velocidade de queda individual dos materiais foram superiores aos valores de velocidade de queda na mistura. Esse comportamento foi decorrente da presença dos sedimentos coesivos, que modificaram a interação entre os grãos (*hindering settling*). A massa específica do sedimento interferiu na sua velocidade de queda. Os sedimentos de fração granulométrica maior depositaram-se antes dos sedimentos de menor fração granulométrica. Algumas variações podem ser decorrentes da floculação do material coesivo. Porém, não houve indícios da formação de grandes flocos capaz de alterar o mecanismo de deposição dos grãos.

### **3.3.1. AUMENTO DA ESCALA DO TAMANHO DOS SEDIMENTOS**

A velocidade média dos experimentos foi 8,1 cm/s e a altura média da corrente foi em torno de 2 cm a aproximadamente 200 cm da desembocadura (Tabela 3.6). Foi feito um aumento de escala do tamanho dos grãos e concluiu-se que um valor aceitável da velocidade do protótipo pode ser 3 m/s (Figura 3.49). Portanto, a velocidade da corrente foi reduzida por um fator de 37 vezes. Sendo assim, a velocidade de queda dos sedimentos do protótipo variaria de 16,65 mm/s a 822,14 mm/s, o que corresponde a grãos com fração granulométrica entre aproximadamente 62  $\mu$ m (limite entre areia muito fina e silte) e 12 mm (faixa de seixos) (Figura 3.5). Esses dados estão coerentes com o observado na natureza.



**Figura 3.52:** Gráfico da velocidade de queda para os sedimentos e mistura do protótipo segundo a Equação de Rubey (1933). Modificado de Guirro (2008).

Os grãos de carvão não foram representados no gráfico que compara a velocidade de queda com o diâmetro dos grãos, o qual representa os resultados da equação de Rubey. O gráfico foi construído com base em dados relacionados à areia quartzosa. Portanto, para grãos com maior massa específica do que o carvão. Uma curva específica calculada para o carvão mineral representaria velocidades de quedas menores em comparação com a curva gerada pela equação de Rubey.

Os sedimentos do protótipo representados pelo ballotini apresentaram velocidade de queda variando de 10,36 mm/s a 2242,57 mm/s, o que correspondeu a grãos de fração granulométrica entre 61  $\mu\text{m}$  (silte grosso) e mais de 16 mm (faixa de seixos). Corresponderam aos sedimentos

mais grossos do protótipo. O caulim representou os sedimentos do protótipo com velocidade de queda entre 9,99 mm/s e 616,79 mm/s, o que correspondeu a grãos com fração granulométrica entre 60  $\mu\text{m}$  (silte grosso) e 8 mm (faixa de seixos). Corresponderam aos sedimentos mais finos do protótipo. Porém, vale ressaltar que os valores que indicaram o caulim como representantes de seixos foram influenciados pela flocculação dos grãos. Por essa razão, não foi considerado que o caulim estava representando seixos, apenas os grãos de menor fração granulométrica. A mistura era composta por grãos que representaram grãos do protótipo com fração granulométrica entre aproximadamente 62  $\mu\text{m}$  (limite entre areia muito fina e silte) e 12 mm (faixa de seixos).

A espessura das correntes de densidade observadas na natureza varia em torno de 5 e 100 metros (Zeng & Lowe, 1997). Nas simulações físicas esse valor é cerca de 100 a 1000 vezes menor. A velocidade de avanço das correntes de turbidez na natureza varia de 1 a 15 m/s e dos fluxos de detritos pode chegar a 30 m/s (Mohrig *et al.* 1998). Em laboratório esse valor é cerca de 10 a 100 vezes menor (Middleton, 1966a). Portanto, os dados obtidos encontram-se dentro de uma variação aceitável uma vez que o fator de redução de velocidade dos experimentos foi de 37 vezes.

### **3.4. ANALOGIA ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS SISTEMAS TURBIDÍDICOS DO REGISTRO GEOLÓGICO**

Distintos modelos deposicionais foram propostos para classificar os sistemas turbidíticos. Entre esses modelos, têm-se os sistemas i) de margem passiva e de margem ativa, ii) ricos em lama e ricos em areia, iii) eficientes e pouco eficientes. O primeiro modelo deposicional de depósito turbidítico foi proposto por Bouma (1962) e foi gerado com base nas variações verticais das características dos depósitos, através da identificação da organização interna das estruturas sedimentares. Porém, novas interpretações foram propostas no decorrer do tempo para caracterizar os depósitos turbidíticos. A maioria dos estudos buscou classificar as correntes de densidade e relacioná-las aos seus respectivos depósitos (Figura 3.53).

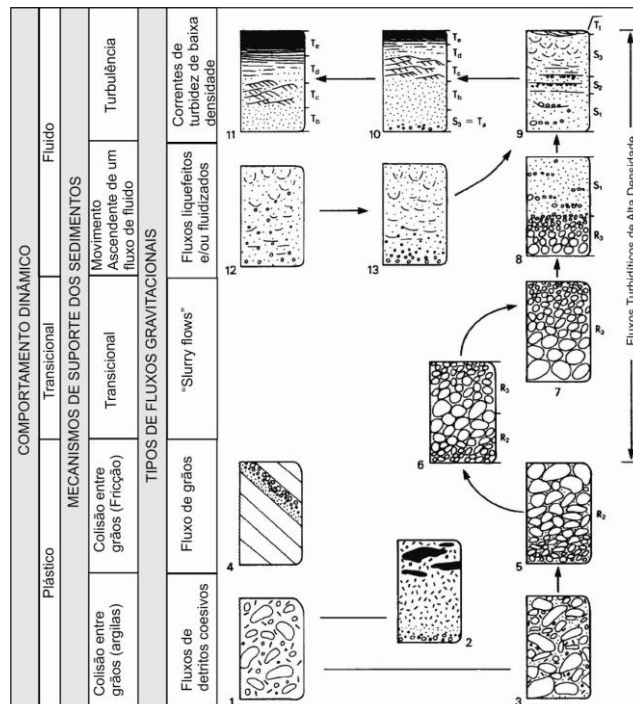
		Fração Granulométrica	Bouma (1962)	Middleton e Hampton (1973)	Lowe (1982)	Shanmungan (1997)
	Te	Lama	Laminada e homogênea	Pelágicos (Correntes turbidíticas de baixa densidade)	Pelágicos	Pelágicos
	Td	Areia Fina	Laminação plano paralela	Correntes turbidíticas	Correntes de turbidez de baixa densidade	Correntes de fundo (retrabalhamento)
	Tc		Ripples e climbing ripples			
	Tb	Areia Grossa a Areia Média (com grânulos na base)	Laminação plano paralela		Correntes de turbidez de alta densidade	Fluxos de detritos arenosos
	Ta		Maciço, Gradação normal			

**Figura 3.53:** Sequência clássica de Bouma e as novas interpretações para os depósitos turbidíticos ao longo do tempo. Modificado de Shanmungan (1997).

Middleton & Hampton (1973) sugeriram que a sequência de Bouma completa corresponde a um depósito de corrente de turbidez bem desenvolvida. Lowe (1982) introduziu um novo modelo vertical para turbiditos grossos, gerados por correntes de turbidez de alta e de baixa densidade. Shanmugam (1997) propôs que nas correntes de turbidez os grãos de fração granulométrica maior seriam depositados individualmente (grão-a-grão) pela ação da gravidade e os de fração granulométrica menor seriam depositados posteriormente por decantação, e em menor intensidade por tração. Os fluxos gravitacionais mais concentrados tenderiam a formar uma camada mais concentrada, maciça e homogênea na sua porção basal. O tempo para a seleção dos grãos seria limitado, o que ocasionaria a formação de depósitos maciços. Como a turbulência seria inibida com o aumento da concentração, a segregação vertical dos grãos em função do seu tamanho não ocorreria.

As simulações físicas realizadas nessa pesquisa simularam canais deposicionais confinados lateralmente. Os depósitos gerados foram caracterizados por possuir uma camada basal maciça, composta por grãos de frações granulométricas grossas. Em direção ao topo ocorreu a diminuição do tamanho dos grãos e o desenvolvimento de gradação normal. As correntes de densidade simuladas foram classificadas como fluxos de turbidez de alta densidade (Lowe, 1982) ou correntes de turbidez de alta concentração (Shanmugam, 2000). O caráter bipartido definido por Mutti *et al.* (1999) e Shanmugam (2000) foi bem evidente em todas as simulações físicas

realizadas. Os depósitos gerados apresentaram características semelhantes ao intervalo Ta (maciço ou com gradação normal), Tb (laminações plano-paralelas) e Tc (laminações oblíquas de baixo ângulo) da clássica sequência de Bouma, bem como representaram o registro deposicional da etapa evolutiva 7 do fluxo gravitacional (Figura 3.54), segundo o senso de Lowe (1982).

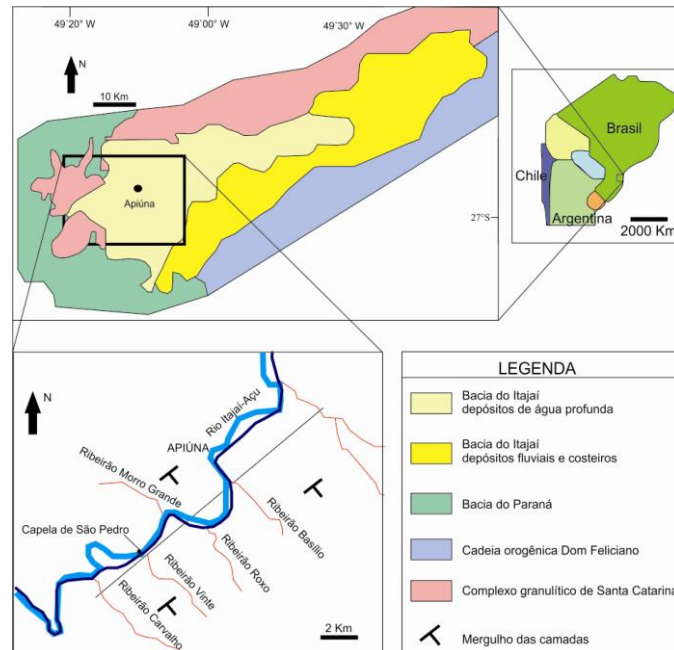


**Figura 3.54:** Comportamento reológico, mecanismos de suporte e registro deposicional das etapas evolutivas do fluxo gravitacional de sedimento ao longo de sua trajetória em direção às porções mais distais da bacia. Modificado de Lowe (1982).

As correntes de baixa concentração simuladas apresentaram analogia mais satisfatória em relação as correntes de turbidez do protótipo, pois, conforme foi exposto no decorrer da dissertação, essas correntes apresentaram o caráter bipartido mais desenvolvido em um maior intervalo de tempo. Além disso, a segregação vertical e horizontal dos sedimentos foi mais evidente nas correntes de baixa densidade, o que é característico das correntes de turbidez observadas na natureza. Em todas as simulações físicas as diferenças de densidade intrínsecas das correntes foram evidentes e preservadas nos depósitos. No decorrer de todos os experimentos ocorreu segregação dos grãos, com diminuição de espessura e da fração granulométrica. Além disso, foram geradas estruturas sedimentares como laminações cruzadas de baixo ângulo e laminações plano paralelas.



Uma seqüência clássica de depósitos de água profunda e que pode ser relacionada aos experimentos realizados é a Unidade Apiúna (UA), presente na Bacia do Itajaí. Essa bacia está localizada no estado de Santa Catarina (Brasil), possui idade pré-cambriana e foi interpretada como de antepaís, ligada à formação de estrutura orogenética Dom Feliciano (Figura 3.55).

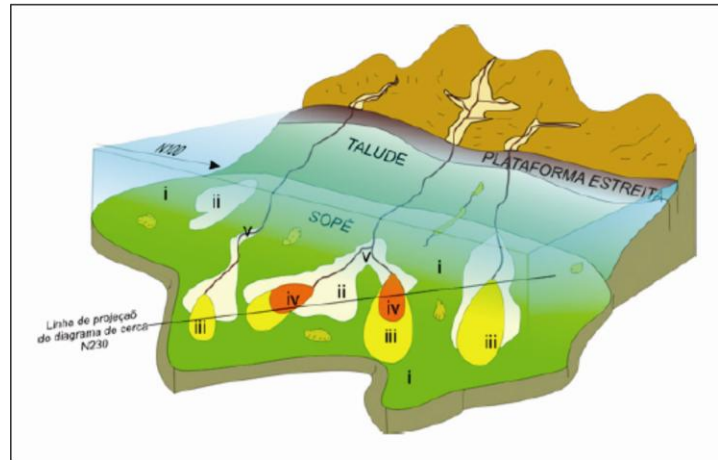


**Figura 3.55:** Localização e mapa geológico esquemático da Bacia do Itajaí. Modificado de Basilici 2006 e De Luca & Basilici 2008.

Distintos modelos foram propostos para interpretação da sucessão estratigráfica da UA. O modelo proposto por Krebs *et al.* (1988) considera a UA a unidade mais recente do preenchimento da Bacia do Itajaí, estando situada acima de depósitos areníticos e conglomeráticos de origem continental e costeira. O modelo proposto por Rostirolla *et al.* (1999) considera que a UA estaria localizada entre duas unidades de sedimentos areníticos e conglomeráticos, continentais e costeiros. A unidade mais antiga teria proveniência da margem norte da bacia e a unidade mais recente teria proveniência da margem sul da bacia. Basilici (2006) e De Luca & Basilici (2008) interpretaram a UA como resultante de um sistema de água profunda rico em pelito, segundo a classificação de Reading & Richards (1994), ou sistema turbidítico de grãos finos (Bouma 2000).

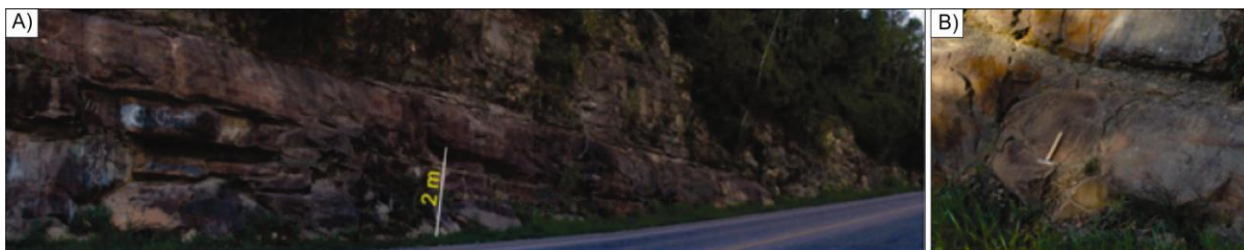
Foram diferenciados cinco elementos arquiteturais na Unidade Apiúna: i) pelitos laminados e depósitos de escorregamento (*slump*) depositados em um sopé lamoso (*muddy rise*); ii) pelitos e

sutis camadas de arenitos, correspondentes a depósitos de overbank ou inter-canal; iii) arenitos amalgamados correspondentes à arenitos de lençóis de areia proximais; iv) arenitos com sutis camadas de pelitos relacionados à lençóis de areia distais; v) Conglomerados, arenitos e interestratificação de arenitos e pelitos correspondentes à canais e diques marginais (Basilici 2006; De Luca & Basilici 2008) (Figura 3.56).



**Figura 3.56:** Esquema da distribuição dos elementos arquiteturais e hipotética reconstrução do sistema deposicional da Unidade Apiúna (Bacia do Itajaí – Santa Catarina – Brasil) i) pelitos laminados e depósitos de escorregamento – sopé lamoso; ii) pelitos e sutis camadas de arenitos – depósitos de overbank ou de intercanal; iii) arenitos amalgamados – lençóis de areia proximais; iv) arenitos com sutis camadas de pelitos – lençóis de areia distais; v) conglomerados, arenitos e interestratificações de arenitos e pelitos – sistema de canal e diques marginais. Fonte Basilici (2006) e De Luca & Basilici (2008).

Os experimentos simularam fluxos gravitacionais com certa analogia às correntes de densidade que geraram os arenitos amalgamados da UA. Esse elemento arquitetural foi caracterizado por camadas bipartidas de arenitos médios ou médio-finos, de geometria tabular ou levemente lenticular (Figura 3.57A). A porção inferior era composta por arenitos médios ou médio-grosseiros, sem estruturas sedimentares ou com carpetes de tração e intraclastos flutuantes. A porção superior era composta por arenitos muito finos, que passavam para arenitos pelíticos ou pelíticos areníticos, com estratificações plano-paralelas e laminações cruzadas (Basilici, 2006; De Luca & Basilici 2008) (Figura 3.57B).



**Figura 3.57:** A) Camadas de arenito com geometria tabular a levemente lenticular; B) Arenitos bipartidos: porção inferior composta de arenitos médio-fino sem estrutura e porção superior composta de arenitos muito finos com estruturas de tração. Modificado de Basilici, 2006 e De Luca & Basilici (2008).

Os experimentos simularam fluxos gravitacionais com certa analogia às correntes de densidade que geraram os arenitos correspondentes a canais da UA (elemento arquitetural v - Conglomerados, arenitos e interestratificação de arenitos e pelitos correspondentes a canais e diques marginais). Esse elemento arquitetural foi caracterizado por uma parte inferior composta de conglomerados e arenitos, a qual constitui o preenchimento do canal por fluxos gravitacionais de alta densidade (Figura 3.58), e uma parte superior com interestratificações de arenitos e pelitos, a qual foi relacionada a depósitos de diques marginais (Basilici, 2006; De Luca & Basilici 2008). Os arenitos observados no registro geológico apresentaram características bipartidas similares as dos depósitos gerados nas simulações físicas.



**Figura 3.58:** Depósitos de canal pertencentes, representados por arenitos bipartidos similares aos depósitos gerados nas simulações físicas. Bastão de Jacob: 1,5 m. Fonte De Luca & Basilici (2008).

As simulações físicas reproduziram um canal deposicional reto que se estendeu por todo o tanque de experimentação. Devido ao reduzido tempo de duração dos experimentos e ao disparo de uma única corrente por experimento, não foram gerados canais compostos e, conseqüentemente, complexos de canais. Por ser confinado lateralmente, não ocorreu a bifurcação em canais

distributários na porção distal. Ressalta-se que as correntes simuladas foram compatíveis com os fluxos mais subcríticos monitorados na natureza.

#### 4. CONCLUSÕES

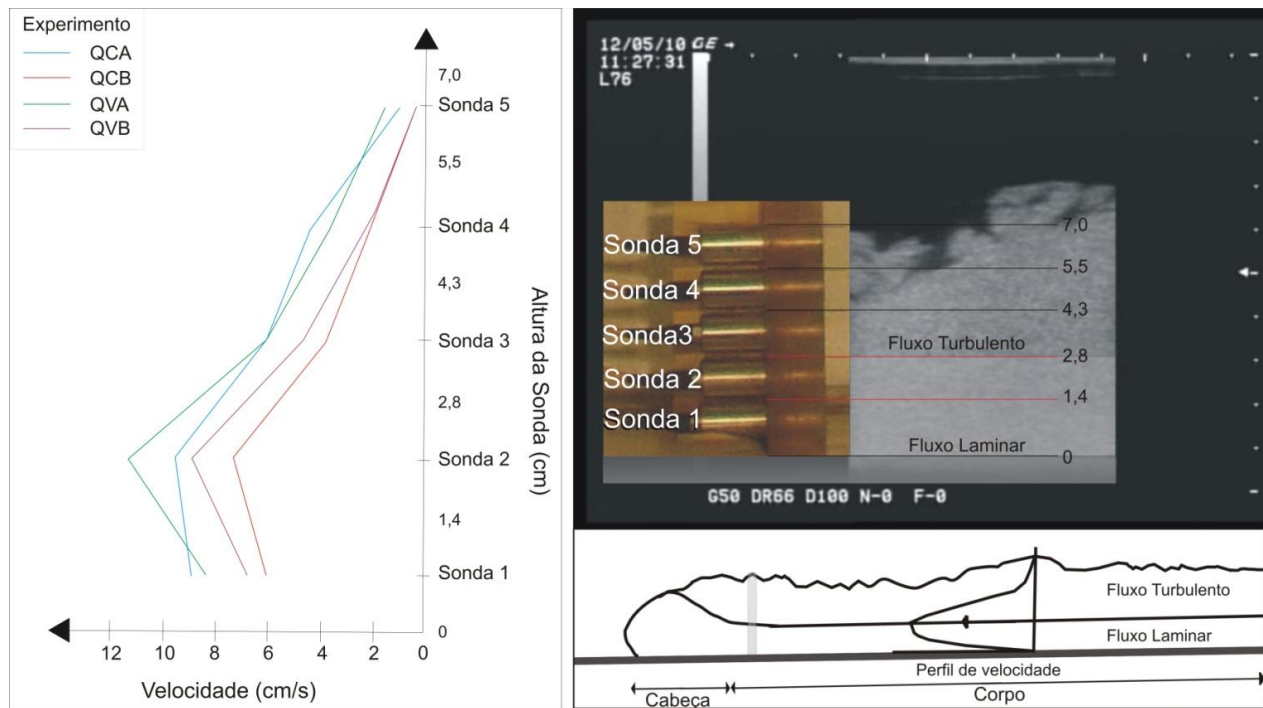
O estudo experimental de correntes de densidade realizado permitiu identificar as características intrínsecas de tais correntes (parâmetros geométricos, dinâmicos e cinemáticos), bem como os mecanismos de deposição. Essas informações foram correlacionadas com os depósitos gerados, a fim de se estabelecer as condições de causa e efeito entre eles. Os parâmetros de variação entre os experimentos foram a vazão e a concentração da corrente.

A variação da vazão alterou as características geométricas e cinemáticas da corrente, bem como as características das camadas depositadas. As variações da vazão foram diretamente proporcionais às variações da altura e velocidade da corrente. As vazões mais elevadas implicaram no aumento da altura e velocidade de escoamento do fluxo (*waxing flow*). Conforme a vazão foi reduzida, desenvolveram-se altura e velocidade mais baixa (*waning flow*). Essa relação entre a vazão e a velocidade foi relativamente óbvia de se prever, uma vez que a seção transversal do duto de alimentação da corrente foi mantida constante (equação 1). O aumento da vazão implicou no aumento do comprimento do depósito. Os grãos foram transportados para mais longe, o que fez com que o comprimento do depósito aumentasse. Os menores valores de vazão favoreceram a deposição dos sedimentos mais densos.

A variação da concentração foi diretamente proporcional à variação da velocidade e inversamente proporcional à variação da altura. Os fluxos de alta concentração desenvolveram cabeça e corpo menos espessos e velocidade de deslocamento maior em relação aos fluxos de baixa concentração. O aumento da concentração aumentou a diferença de densidade entre o fluxo e o fluido ambiente e, conseqüentemente, a média de velocidade do fluxo. O agente motriz das correntes de densidade é a diferença (excesso) de densidade entre os fluidos. A variação da concentração afetou a taxa de deposição. A influência da concentração dos sedimentos incidiu sobre a massa de grãos passíveis de serem depositados. O aumento da concentração gerou depósitos com maior espessura. A diminuição da concentração gerou depósitos menos espessos.

A concentração e a presença de sedimentos coesivos influenciaram diretamente o comportamento reológico das correntes e, conseqüentemente, o seu comportamento hidrodinâmico e deposicional. As correntes simuladas foram caracterizadas por uma subcamada viscosa, pela região de *plug* e pela porção superior turbulenta. Essa estratificação vertical influenciou o perfil

de velocidade da corrente. As velocidades máximas foram registradas no limite da região de *plug* com a porção superior turbulenta (Figura 4.1).

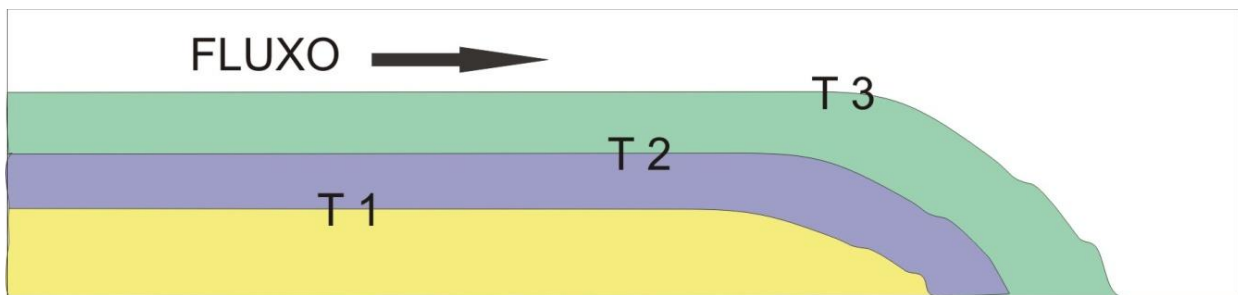


**Figura 4.1:** Perfil vertical de estratificação do fluxo, com os maiores valores de velocidade registrados entre o limite da região de *plug* com a porção superior turbulenta.

A menor concentração do fluxo favoreceu o desenvolvimento contínuo da porção superior turbulenta. Quanto menor a concentração/densidade do fluxo, a sua viscosidade diminuiu e conseqüentemente favoreceu a turbulência. As simulações conseguiram reproduzir o que o número de Reynolds estabelece: quanto menor a viscosidade de um fluxo, maior é o número de Reynolds, e seu escoamento tende a caracterizar um fluxo turbulento. Apesar de a turbulência ter sido favorecida devido à menor concentração do fluxo, a porcentagem de caulim foi elevada, aumentando a coesão. Conseqüentemente, em certos momentos do escoamento a porção superior turbulenta foi menos expressiva. Por outro lado, a presença de caulim foi fundamental para evitar que os grãos de carvão e de ballotini se depositassem muito precocemente. As correntes de densidade apresentaram comportamento reológico predominantemente pseudoplástico. O aumento da concentração favoreceu o desenvolvimento do *debris flow*, inibindo o desenvolvimento da porção superior turbulenta, a qual passou a ser representada por uma nuvem diluída de sedimentos.



O depósito da camada basal cisalhante se formou por progressiva agradação, considerando um ponto fixo de observação. Porém, ao analisar a deposição ao longo do espaço, inferiu-se o desenvolvimento da progradação do depósito (Figura 4.2). O depósito formado apresentou um movimento inercial devido ao elevado teor de argila. Apesar de continuar em movimento, não foi considerado como um fluxo. Middleton (1966b) denominou essa zona cisalhante basal como *quick bed*, a qual representava o próprio depósito. O mecanismo de deposição da região de *plug* foi determinado pelo congelamento *em massa* do fluxo laminar quase que instantaneamente à conclusão da vazão, por fricção ou imobilização coesiva. Os sedimentos presentes na porção superior foram depositados por decantação. A taxa de sedimentação da porção basal foi maior do que a taxa de deposição da porção superior. Conseqüentemente o fluxo desacelerou mais rapidamente na porção basal em comparação à porção superior, a qual apresentou valores de velocidade mais homogêneos.



**Figura 4.2:** Esquema dos depósitos gerados nas simulações físicas com extrapolação das escalas verticais e horizontais, as quais não são iguais. Depósito formado por agradação, ao considerar um ponto fixo de observação, e por progradação, ao considerar os dados ao longo do espaço.

A taxa de deposição dos sedimentos foi influenciada pelas frações granulométricas e densidade dos grãos, assim como pela concentração e pela vazão do fluxo. Esses fatores apresentaram relação direta com a deposição dos sedimentos. A influência das frações granulométricas e da densidade dos grãos na taxa de deposição foi relacionada à velocidade de queda dos mesmos. A variação da concentração afetou a taxa de deposição. A influência da concentração dos sedimentos incidiu sobre a massa de grãos passíveis de serem depositados. A variação da vazão alterou a dinâmica da corrente e as características das camadas depositadas. O comprimento do depósito aumentou nos momentos de vazão mais elevadas.

Os depósitos apresentaram tendência de acúmulo nas porções mais proximais do tanque, com diminuição das espessuras e das frações granulométricas em direção à porção distal. Essa

diferenciação foi mais evidente nos experimentos com baixa concentração em comparação aos experimentos de alta concentração. Portanto, constatou-se que o aumento da concentração implicou no aumento da massa do depósito, porém a sua espessura tendeu a permanecer constante. Os grãos foram transportados para maiores distâncias, o que gerou o aumento do comprimento do depósito. O aumento da concentração dificultou a decantação dos sedimentos (*hindered settling*). Esse comportamento foi decorrente da interação entre as partículas que manteve os grãos em movimento (aumentando a capacidade de transporte da corrente) e retardou a sedimentação dos mesmos.

Após terem sido realizadas todas as análises, foram propostos modelos de deposição considerando correntes de alta e correntes de baixa concentração, bem como fluxos permanentes e transientes.

O modelo gerado considerando a diferença de concentração entre as correntes evidenciou que a menor concentração favorece o desenvolvimento de depósitos menos espessos em comparação com as correntes de maior concentração. Além disso, a variação granulométrica vertical e horizontal é menos evidente conforme o aumento da concentração.

O modelo gerado considerando a variação de velocidade das correntes evidenciou que nos momentos de baixa vazão é favorecida a deposição dos sedimentos mais densos e de fração granulométrica maior. Esse comportamento é decorrente da capacidade de transporte dos grãos. Nos momentos de vazão mais elevada as camadas geradas são compostas por grãos de fração granulométrica mais fina e os sedimentos mais grossos são transportados para as regiões distais.

Nas simulações físicas, as correntes com vazão variada originaram camadas de acordo com os picos de vazão. Nos experimentos com vazão constante, as camadas geradas foram reflexo da concentração diferenciada de sedimentos no interior das correntes. A porção basal do fluxo bipartido, caracterizada pelo fluxo laminar, apresentou essa variação vertical de densidade. Os sedimentos mais densos deslocaram-se na porção inferior e os menos densos na porção superior. A deposição do fluxo laminar ocorreu por congelamento em massa. Portanto, o depósito registrou a segregação dos grãos no interior da corrente, gerando uma camada basal composta predominantemente por sedimentos siliciclásticos mais grossos e uma camada superior composta por sedimentos siliciclásticos mais finos e com maior concentração de carvão. Porém, os grãos de carvão estavam distribuídos aleatoriamente nas duas camadas. Os sedimentos mais finos transportados em suspensão na nuvem turbulenta geraram a gradação normal observada no topo

do depósito. Esse processo foi responsável pela diferenciação das camadas na região distal nos experimentos com vazão variada (Experimento QVA e Experimento QVB).

As correntes simuladas corresponderam aos fluxos gravitacionais subcríticos monitorados na natureza, cujos sedimentos foram representados por grãos de tamanho entre areia muito fina e seixos. Porém, devido à predominância de grãos do protótipo com, no máximo, tamanho areia muito grossa e à utilização de sedimentos de baixa densidade e de frações granulométricas finas, considerou-se coerente a analogia das características derivadas dos experimentos com os sistemas turbidíticos de grãos finos existentes no registro geológico. As simulações físicas reproduziram um canal deposicional reto que se estendeu por todo o tanque de experimentação.

A Unidade Apiúna (UA), aflorante na Bacia do Itajaí localizada no estado de Santa Catarina (Brasil), foi relacionada aos experimentos realizados uma vez que representa uma clássica sequência de depósitos de água profunda. O modelo deposicional considerado interpreta a UA como resultante de um sistema de água profunda rico em pelito ou sistema turbidítico de grãos finos, dependendo da classificação considerada.

Foram diferenciados cinco elementos arquiteturais na Unidade Apiúna: i) pelitos laminados e depósitos de escorregamento (*slump*) depositados em um sopé lamoso (*muddy rise*); ii) pelitos e sutis camadas de arenitos, correspondentes a depósitos de overbank ou inter-canal; iii) arenitos amalgamados correspondentes à arenitos de lençóis de areia proximais; iv) arenitos com sutis camadas de pelitos relacionados à lençóis de areia distais; v) Conglomerados, arenitos e interestratificação de arenitos e pelitos correspondentes à canais e diques marginais (Basilici, 2006; De Luca & Basilici 2008).

Os experimentos simularam fluxos gravitacionais com certa analogia às correntes de densidade que geraram os arenitos correspondentes a canais da UA. Esse elemento arquitetural foi caracterizado por uma parte inferior composta de conglomerados e arenitos, a qual constitui o preenchimento do canal por fluxos gravitacionais de alta densidade, e uma parte superior com interestratificações de arenitos e pelitos, a qual foi relacionada a depósitos de diques marginais (Basilici, 2006; De Luca & Basilici 2008). Os arenitos observados no registro geológico apresentaram características bipartidas similares as dos depósitos gerados nas simulações físicas.

Os experimentos simularam fluxos gravitacionais com certa analogia às correntes de densidade que geraram os arenitos amalgamados da UA. Esse elemento arquitetural foi caracterizado por camadas bipartidas de arenitos médios ou médios-finos, de geometria tabular ou levemente

lenticular. A porção inferior era composta por arenitos médios ou médio-grosseiros, sem estruturas sedimentares ou com carpetes de tração e intraclastos flutuantes. A porção superior era composta por arenitos muito finos, que passavam para arenitos pelíticos ou pelíticos areníticos, com estratificações plano-paralelas e laminações cruzadas (Basilici, 2006; De Luca & Basilici 2008).

A analogia mais satisfatória entre as correntes simuladas e as correntes de turbidez do protótipo ocorreu com as correntes de baixa concentração, as quais apresentaram o caráter bipartido mais desenvolvido em um maior intervalo de tempo. Além disso, a segregação vertical e horizontal dos sedimentos foi mais evidente nas correntes de baixa densidade, o que é característico das correntes de turbidez observadas na natureza. Em todas as simulações físicas as diferenças de densidade intrínsecas das correntes foram evidentes e preservadas nos depósitos. No decorrer de todos os experimentos ocorreu segregação dos grãos, com diminuição de espessura e da fração granulométrica. Os canais simulados foram deposicionais. A utilização de sedimentos com menor massa específica, bem como a elevada concentração de caulim, favoreceram a capacidade de erosão e de transporte dos grãos. Porém, para a geração de canais erosivos será necessário a utilização de sedimentos com menor massa específica, como por exemplo partículas de plástico. Sugere-se que sejam desenvolvidas novas simulações físicas com a utilização de material com baixa densidade, como o acrílico. Isso se justifica pelos seguintes motivos: i) Se o material é pouco denso podem ser usadas partículas maiores. Isso facilita a visualização dos mecanismos de deposição; ii) Material de baixa densidade é transportado por uma distância maior pela corrente de densidade. Sendo assim, infere-se que o acúmulo excessivo de partículas próximo ao ponto de alimentação da corrente será evitado.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, J. & MORRIS, S. Observations on experimental non channelized , high-concentration turbidity currents and variations in deposits around obstacles. **Journal of Sedimentary Research**. V. A64, n.4, p. 899-909, 1994.

ALEXANDER, J. & MULDER, T. Experimental quasi-steady density currents. **Marine Geology**, V. 186, p. 195-210, 2002.

ÁVILA, M. D. **Modelagem física de correntes de densidade no estudo de depósitos turbidíticos**. Porto Alegre, 2003. 126 p. Tese de Mestrado em Geociências - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BAAS, J.H.; KESTEREN, W.V.; POSTMA, G. Deposits of depletive high-density turbidity currents: a tanque analogue of bed geometry, structure and texture. **Sedimentology**. V. 51, p. 1053-1088, 2004.

BASILICI G. 2006. Depositional mechanisms and architecture in an pre-early Cambrian deep-waterramp (Apiúna Unit, South Brazil). **Sedimentary Geology**. V. 187, p.183-204.

BAGNOLD, R.A. Auto-suspension of transported sediment, turbidity currents. **Proc. Roy. Soc. London**, A225, p. 315-319, 1962.

BONNECASE, R.T.; HUPPERT, H. E.; LISTER, J. R. Particle-driven gravity currents. **Journal of Fluid Mechanics**. V. 250, p. 339-369, 1993.

BOUMA, A. H. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation. Elsevier, 168 p, 1962.

BOUMA, A.H. Coarse-grained and fine-grained turbidite systems as end member models: applicability and dangers. **Marine and Petroleum Geology**. V. 17, p. 137-143, 2000.

BRITO, D.U. **Efeito das escalas de simulação sobre os padrões deposicionais de fluxos turbidíticos**. Porto Alegre, 2003. 99 p. Tese de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DEL REY, A.C. **Simulação física de processos gravitacionais subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda**. Porto Alegre, 2006. 229 p. Tese de Doutorado em Geociências - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DE LUCA, P. V. & BASILICI, G. Análogos de reservatórios de rampa de água profunda: sistemas ricos em lama (unidade de Apiúna-SC) e em areia (Formação Punta Negra, Pré-Cordilheira Argentina). **Revista Brasileira de Geociências**. V. 38, 140 – 158 p, 2008.

DÜCKER, R. E. **Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez**. Porto Alegre, 2007. 101 p. Tese de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FELIX, M.; STURTON, S.; PEAKALL, J. Combined measurements of velocity and concentration in experimental turbidity currents. **Sedimentary Geology**. V. 179, p. 31–47, 2005.

GLADSTONE, C.; PHILLIPS, J. C.; SPARKS, R. S. J. Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition. **Sedimentology**. V. 45, p. 833 – 843, 1998.



GUIRRO, A. C. **Simulações físicas de correntes de turbidez: efeitos da variação do tamanho dos grãos e da vazão.** Porto Alegre, 2008. 160 p. Tese de Doutorado em Geociências - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HALLWORTH, M.A. & HUPPERT H.E. Abrupt transitions in high-concentration, particle-driven gravity currents. **Physics of Fluids**. V.10, n. 5, p. 1083-1087, 1998.

HAMPTON, M.A. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents. **Journal of Sedimentary Petrology**. V. 42, n.4, p. 775-793, 1972.

HUPPERT, H. E & SIMPSON, J. E. The slumping of gravity currents. **Journal of Fluid Mechanics**. V. 99, n. 4, p. 785 – 799, 1980.

KREBS, J.A.S., CALDASSO, S.A.L., LOPES, C.R., CAMOZZATO, E. Interpretação preliminar da seqüência deposicional da Bacia do Grupo Iatajá na área da Folha Bo-tiverá - SC. **Congresso Brasileiro de Geologia**, 35, Belém, Pará, Atas, v.2, p. 592-605, 1988.

LAVAL, A.; CREMER, P.; BEGHIN, P. E.; RAVENNE, C. Density surges: two-dimensional experiments. **Sedimentology**. V. 35, p. 73-84, 1988.

KNELLER, B. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: HARLEY, A.J. & PROSSER, D.J. (eds): **Characterization of Deep Marine Clastic Systems, Geological Society Special Publication**, V. 94, p. 31-49, 1995.

KNELLER, B.C. & BRANNEY, M.J. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands. **Sedimentology**. V. 42, p. 607-616, 1995.

KNELLER, B.C.; BENNETT, S.J.; McCAFFREY, W.D. Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. **J. Geophys. Res. Oceans**. V. 94, p. 5281-5291, 1999.

KNELLER, B.C; BUCKEE, C. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. **Sedimentology**. V. 47, n. 1, p. 62-94, 2000.

KUBO, Y. Experimental and numerical study of topographic effects on deposition from two-dimensional, particle-driven density currents. **Sedimentary Geology**. V. 164, p. 311-326, 2004.

KUENEN, P.H. Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons. **Leidse Geo. Meded.** V. 8, p. 327-355, 1937.

KUENEN, P.H. Turbidity currents of high density. In: 18th Intern. Geol. Congr. **Reports**, London, p. 44-52, 1950.

KUENEN, P.H. & MIGLIORINI, C.I. Turbidity currents as a cause of graded bedding. **Journal of Geology**. V. 58, n. 2, p. 91-128, 1950.

LECLAIR, S.F. & ARNOTT, R.W.C. Parallel lamination formed by high-density turbidity current. **Journal of Sedimentary Research**. V. 75, n. 1, p. 1-5, 2005.

LOWE, D.R. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. **Journal of Sedimentary Petrology**. V. 52, p. 279-297, 1982.

LÜTHI, S. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposits. **Marine Geology**. V. 40, n. 3/4, p. 59-68, 1981.

MANICA, R.; DEL REY, A.C.; MAESTRI, R.D.; BORGES, A.L.O.; VIANA, A.R. Influência do mecanismo de disparo na dinâmica dos fluxos e na geometria dos depósitos gerados: observações obtidas a partir de estudo experimental de correntes de densidade não conservativas. **Bol. Geoc. Petrobras**. V. 13, n.1, p. 43-60, 2005.

MANICA, R. **Modelagem física de correntes de densidade não-conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada**. Porto Alegre, 2002. 161 p. Tese de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MANICA, R. **Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais**. Porto Alegre, 2009. Tese de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARR, J.G.; HARFF, P.A.; SHANMUGAN, G.; PARKER, G. Experiments on subaqueous sandy gravity flow: the role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures. **GSA Bulletin**. V. 113, n. 11, p. 1377-1386, 2001.

McCAFFREY, W.D.; CHOUX, C.M.; BAAS, J.H.; HAUGHTON, P.D.W. Spatiotemporal evolution of velocity structure, concentration and grain-size stratification within experimental particulate gravity currents. **Marine and Petroleum Geology**. V. 20, p. 851-860, 2003.

MIDDLETON, G.V. Experiments on density and turbidity currents III. Deposition of sediment. **Canadian Journal of Earth Sciences**. V. 4, p. 475-505, 1967.

MIDDLETON, G.V. Small-scale models of turbidity currents and the criterion for autosuspension. **Journal of Sedimentary Petrology**. V.36, n. 1, p. 202-208, 1966a.

MIDDLETON, G.V. & HAMPTON, M.A. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. **Proceedings of Pacific Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists**, Los Angeles, 1973.

MIDDLETON, G.V. & NEAL, W.J. Experiments on the thickness of beds deposited by turbidity currents. **Journal of Sedimentary Petrology**. V. 59, n. 2, p. 297-307, 1989.

MIDDLETON, G.V. Sediment deposition from turbidity currents. **Annu. Rev. Earth Sci.** V. 21, p. 89-114, 1993.

MOHRIG, D.; WHIPPLE, K.X.; HONDZO, M.; ELLIS, C.; PARKER, G. Hydroplaning of subaqueous debris-flow. **GSA Bulletin**. V. 110, p. 387-394, 1998.

MOHRIG, D.; ELVERHOI, A.; PARKER, G. Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows, and their capacity to remobilize antecedent deposits. **Marine Geology**. V. 154, p. 117-129, 1999.

MOHRIG, D. & MARR, J.G. Constraining the efficiency of turbidity current from submarine debris flow and slides using laboratory experiments. **Marine and Petroleum Geology**. V. 20, p. 883-899, 2003.

MORRIS, S.A. & ALEXANDER, J. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current. **Journal of Sedimentary Research**. V. 73, n. 4, p. 621-629, 2003.

MOTTA, V.F. **Curso de Teoria da Semelhança**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 153 p, 1972.

MULDER, T. & ALEXANDER, J. The physical character of subaqueous sedimentary density currents and their deposits. **Sedimentology**, V. 48, p. 269-299, 2001a.

MULDER, T. & ALEXANDER, J. Abrupt change in slope causes variation in the deposit thickness of concentrated particle-driven density currents. **Marine Geology**. V. 175, p. 221-235, 2001b.

MUTTI, E. & NORMARK, W.R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: Problems and Concepts. In: Legget, J.K., Zuffa, G.G., (Eds.). **Marine Clastic Sedimentology: concepts and cases studies**. London: p. 1-38, 1987.

MUTTI, E. & NORMARK, W.R. An integrated approach to the study of turbidite systems. In: P. Weimer & M.H. Link (eds.): **Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems**, New York, Springer-Verlag, p. 75-106, 1991.

PACKMAN, A.L & JEROLMACK, D. The role of physicochemical processes in controlling sediment transport and deposition in turbidity currents. **Marine Geology**. V. 204, p. 1-9, 2004.

PARKER, G.; GARCIA, M.; FUKUSHIMA, Y; YU, W. Experiments on turbidity currents over a erodible bed. **Journal of Hydraulic Research**,. V. 25, p. 123-147, 1987.

PARSONS, J.D.; BUSH, J.W.M.; SYVITSKY, J.P.M. Hyperpycnal plume formation from riverine outflows with small sediment concentration. **Sedimentology**. V. 48, p. 465-478, 2001.

POSTMA, G.; NEMEC, W.; KLEINSPEHN, K.L. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. **Sedimentary Geology**. V. 58, p. 47-61, 1988.

READING, H.G. & RICHARDS, M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder systems. **AAPG Bulletin**. V. 78, p. 792-822, 1994.

ROSTIROLLA, S.P., AHRENDT, A., SOARES, P.C., CARMIGNANI, L. Basin analysis and mineral endowment of the Proterozoic Itajaí Basin, south-east Brazil. **Basin Research**. V. 11, p. 127-142, 1999.

SHANMUNGAN, G. The Bouma Sequence and the turbidite mind set. **Earth Science Reviews**, A. 42. p.201-229, 1997.

SHANMUNGAN, G. 50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep water process and facies model: a critical perspective. **Marine and Petroleum Geology**. V. 17, p. 285-342, 2000.

SIEGENTHALER, C & BUEHLER, J. The kinematics of turbulent suspension currents (turbidity currents) on inclined boundaries. **Marine Geology**. V. 64, p. 19-40, 1985.

SIEGENTHALER, C.; HSÜ, K.J.; KLEBOTH, P. Longitudinal transport of turbidity currents – a model study of Horgen events. **Sedimentology**, V. 31, p. 187-193, 1984.

SIMPSON, J.E. & BRITTER, R.E. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. **Journal of Fluid Mechanics**. V. 94, p.447 – 495, 1979.

SPARKS, R.S.J.; BONNECASE, R.T.; HUPPERT, H.E.; LISTER, J.R.; HALLWORTH, M.A.; MADER, H; PHILLIPS, J. Sediment-laden gravity currents with reserving buoyancy. **Earth Planet. Sci. Lett.** V. 114, p. 243-257, 1993.

STIX, J. Flow evolution of experimental gravity currents: implications for pyroclastic flows at volcanoes. **Journal of Geology**. V. 109, n.3, 381-398, 2001.

STOW, D.A.V. & MAYALL, M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century. **Marine and Petroleum Geology**. V. 17, p. 125-135, 2000.

TINTERRI, R.; DRAGO, M.; CONSONNI, A.; DAVOLI, G.; MUTTI, E. modelling subaqueous bipartite sediment gravity flows on the basis of outcrops constraints: first results. **Marine and Petroleum Geology**. V. 20, p. 911-933, 2003.

VROLIJK, P.J. & SOUTHARD, J.B. Experiments on rapid deposition of sand from high-velocity flows. **Geoscience Canada**. V. 24, p. 45-54, 1997.

YU, B.; CANTELLI, A.; MARR, J.; PIRMEZ, C.; O'BYRNE, C.; PARKER, G. Experiments on self-channelized subaqueous fans emplaced by turbidity currents and dilute mudflows. **Journal of Sedimentary Research**. V. 76, p. 889-902, 2006.

ZENG, J. & LOWE, D.R. Numerical simulation of turbidity current flow and sedimentation: I. Theory. **Sedimentology**. V. 44, p. 67-84, 1997.